

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

HUGO AUGUSTO DOS SANTOS

**ASPECTOS RELEVANTES NO PROJETO ESTRUTURAL DE
CASAS DE TRANSFERÊNCIA**

Belo Horizonte

2025

Hugo Augusto dos Santos

**"ASPECTOS RELEVANTES NO PROJETO ESTRUTURAL DE CASAS DE
TRANSFERÊNCIA"**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Estruturas".

Orientador: Gílson Queiroz

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **dez dias** do mês de **janeiro de 2025**, às 10h, em ambiente virtual, o estudante **Hugo Augusto dos Santos**, matrícula 2022683239, defendeu o Trabalho intitulado “**Aspectos Relevantes no Projeto Estrutural de Casas de Transferência**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, após finalizada a apresentação do aluno passaram para a fase de arguição. Os membros da banca consideraram o aluno aprovado e assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: (97)

Orientador(a): Prof. Gilson Queiroz

Nota: (97)

Examinador(a): Prof. Armando Cesar Campos Lavall



Documento assinado eletronicamente por **Armando Cesar Campos Lavall, Professor do Magistério Superior**, em 10/02/2025, às 21:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilson Queiroz, Professor(a)**, em 28/02/2025, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3862238** e o código CRC **46D98197**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Ata de defesa emitida pela secretaria do Curso contendo as assinaturas.

Resumo

Este trabalho apresenta alguns dos aspectos relevantes em um projeto estrutural de casas de transferências para transportadores de correia, a partir do desenvolvimento de um projeto fictício de uma estrutura de aço. Inicialmente, as principais ações que influenciam o dimensionamento da estrutura são identificadas e seu cálculo é detalhado. A metodologia empregada envolveu a criação de um modelo em elementos finitos para o cálculo e verificação da estrutura, seguindo a norma ABNT NBR 8800:2008. A avaliação da estrutura incluiu a análise dos deslocamentos admissíveis, modos naturais de vibração com a comparação das frequências naturais da estrutura com as frequências de excitação conhecidas para a casa de transferência, para indicar ou descartar a necessidade de uma análise dinâmica. Ao fim do projeto, foi elaborado um quadro de cargas para o dimensionamento das fundações. Os resultados do trabalho apresentam um projeto que atende aos critérios estruturais estabelecidos, garantindo a segurança e funcionalidade da estrutura de aço proposta.

Casa de transferência; transportador de correia; estruturas metálicas para a indústria de mineração; método dos elementos finitos; ação da tensão de correia de um transportador em estruturas.

Abstract

This study presents some relevant aspects of a structural design for transfer houses of belt conveyors, based on the development of a fictitious steel structure design. Initially, the main factors influencing the design of the structure are identified, and their calculation is detailed. The selected methodology involved creating a finite element model for the analyses and checking of the structure, following the ABNT NBR 8800:2008 design code. The evaluation of the structure included an analysis of allowable displacements, natural vibration modes, and a comparison of the natural frequencies of the structure with the known excitation frequencies of the transfer house, to indicate if a dynamic analysis is necessary or not. At the end of the design, a load plan was prepared for the foundation design. The results of the work present a design that meets the established structural criteria, ensuring the safety and functionality of the proposed steel structure.

Transfer house; belt conveyor; steel structures for the mining industry; finite elements method; belt tension load in structures of a belt conveyor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	9
3	REVISÃO DA LITERATURA	10
3.1	Propriedades dos Materiais Transportados	10
3.2	Ações Devidas ao Transporte de Material	11
3.2.1	Carregamentos lineares de material na correia	11
3.2.2	Ações devidas ao impacto do material na região de transferência	14
3.2.3	Ações devidas ao bloqueio e entupimento de chutes	15
3.3	Ações Devidas à Tensão na Correia	18
3.4	Ações de Vento	19
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
4.1	Metodologia	22
4.2	Definição da Estrutura	22
4.3	Ações e Combinações de Ações	24
4.3.1	Cálculo das ações	30
4.4	Resultados	36
4.4.1	Perfis metálicos selecionados	36
4.4.2	Deslocabilidade	37
4.4.3	Dimensionamento dos perfis metálicos com base na análise estática	38

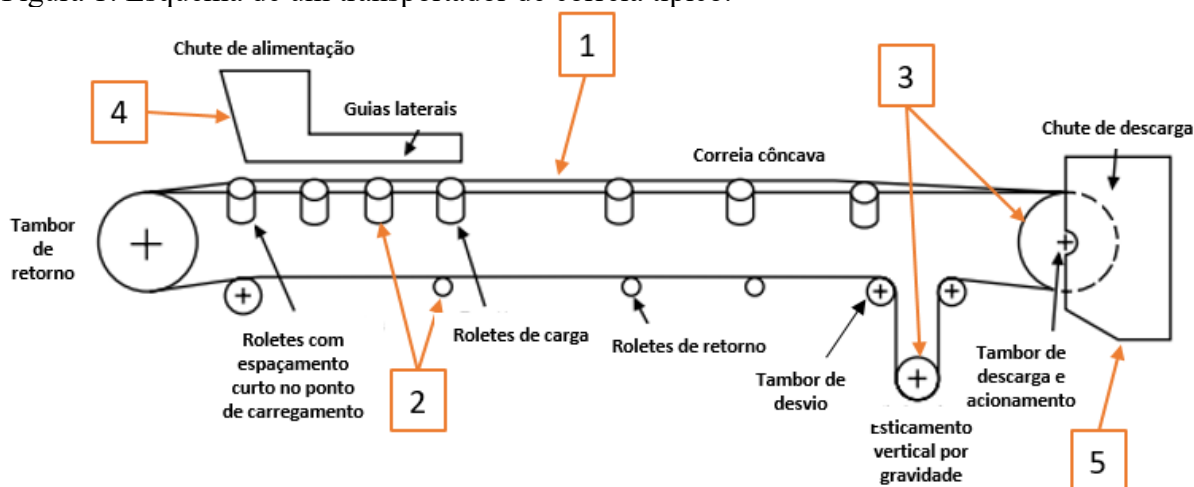
4.4.4	Análise de deslocamentos da estrutura	40
4.4.5	Análise modal da estrutura	42
4.4.6	Quadro de cargas para fundações	48
5	CONCLUSÃO	52
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Os transportadores de correia são equipamentos que utilizam uma correia para transportar materiais a granel. Na indústria da mineração, os transportadores de correia são muito utilizados por apresentarem vantagens para transportes de curta e médias distâncias (até quilômetros dentro de uma planta), como economia, segurança de operação, confiabilidade, versatilidade, entre outros, em relação a outros métodos de transporte como minerodutos e transporte ferroviário ou rodoviário. Tipicamente, um transportador de correia é composto pelos seguintes elementos, mostrados na Figura 1 (CEMA, 2014).

1. Correia.
2. Rolos (de impacto, carga e retorno).
3. Tambores (de descarga, desvio, acionamento, esticamento e retorno).
4. Chute de alimentação.
5. Chute de descarga.

Figura 1: Esquema de um transportador de correia típico.



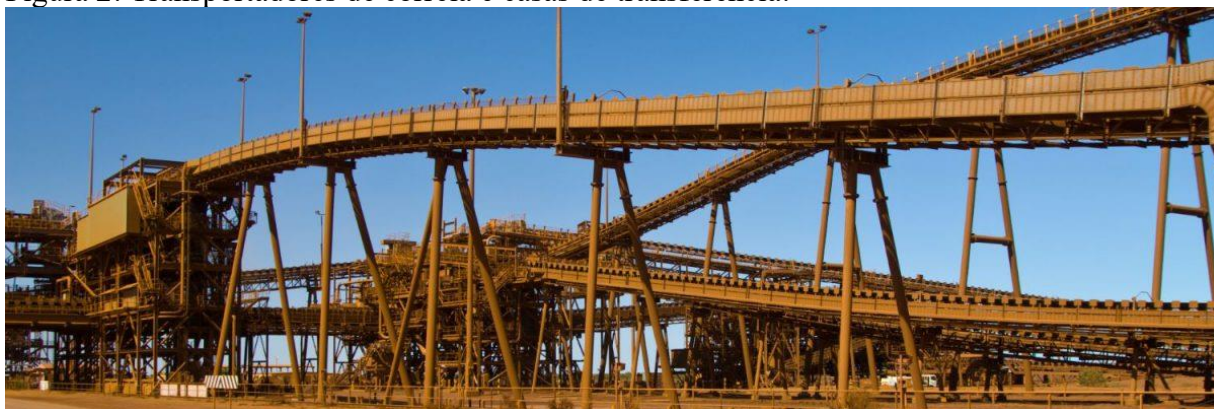
Fonte: CEMA, 2014.

Os transportadores de correia podem assumir diferentes tipos de arranjo, como: horizontal, ascendente, descendente, com curvas côncavas e convexas, dentre outras combinações. As

estruturas dos transportadores de correia são, em geral, estruturas reticuladas de aço, utilizando longarinas de pequenos vãos, apoiadas em colunetas, para trechos baixos, e treliças e galerias de grandes vãos e apoiadas em pilares, para trechos aéreos (CEMA, 2014).

Nos processos de mineração, é comum que um transportador de correia transfira material para um ou mais transportadores de correia ou para outros equipamentos como peneiras vibratórias, britadores e silos. Para facilitar essa transferência de materiais, normalmente, são utilizadas estruturas prediais denominadas casas de transferências. Essas estruturas suportam os transportadores de correia, o chute de descarga e outros equipamentos. Na Figura 2 e na Figura 3 são mostrados exemplos de transportadores de correia e casas de transferência.

Figura 2: Transportadores de correia e casas de transferência.



Fonte: Correias Mercúrio Sa Indústria e Comércio, 2025.

Figura 3: Exemplo de dois transportadores de correia e uma casa de transferência.



Fonte: Tenax Engenharia e Gerenciamento, 2025.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar o dimensionamento de uma estrutura fictícia, apresentando alguns dos aspectos relevantes a serem considerados no dimensionamento estrutural de casas de transferência de transportadores de correia, utilizados na indústria da mineração. A casa de transferência a ser dimensionada suporta um transportador de correia, denominado TC-01, que descarrega material em um segundo transportador, denominado TC-02, também suportado pela casa de transferência.

O estudo desses aspectos é especialmente relevante, uma vez que se trata de um tipo de projeto que não é corriqueiro para engenheiros de estruturas e, em geral, não é tratado na academia. Por suportarem tambores e chutes de descarga de transportadores de correia, as casas de transferência são projetadas para resistir a ações com direção e magnitude diferentes das que

ocorrem em ações típicas de sobrecarga e vento em estruturas residenciais, comerciais ou industriais (as magnitudes são, em alguns casos, muito superiores às ações de outros tipos de edifícios).

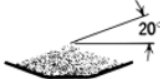
3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Propriedades dos Materiais Transportados

Para a determinação das ações geradas pelo transporte de material nos transportadores de correia, as propriedades desses materiais devem ser determinadas. Nesta seção, serão discutidas as propriedades mais importantes para o projeto estrutural da casa de transferência.

O **ângulo de acomodação** do material é o ângulo entre a pilha de material e a horizontal observado quando o material está em repouso em uma correia em movimento. O ângulo de acomodação é representado na Figura 4 (CEMA, 2014).

Figura 4: Ângulo de acomodação.

Ângulo de acomodação				
5°	10°	20°	25°	30°
				

Fonte: CEMA, 2014.

Semelhantemente ao ângulo de acomodação, o material pode assumir um ângulo ainda maior quando forma pilhas livremente sobre superfícies paradas. Esse ângulo é chamado **ângulo de repouso** e é, em geral, entre 5° e 25° maior que o ângulo de acomodação do material (CEMA, 2014).

Para a determinação do peso linear de material transportado, também é importante determinar a **densidade aparente** deste material. Esta medida pode ser alterada pela compactação, granulometria, umidade e outras características do material transportado.

Além das propriedades do material transportado, a largura da correia e a inclinação dos roletes de carga também são importantes para a determinação da área de seção transversal de material a ser transportado.

3.2 Ações Devidas ao Transporte de Material

As estruturas que suportam transportadores de correia devem ser dimensionadas para suportar as ações causadas pelo transporte do material. Essas ações são determinadas para a região de transferência de material (ações de impacto e entupimento) e para as demais regiões carregadas do transportador (carregamentos lineares de material).

3.2.1 Carregamentos lineares de material na correia

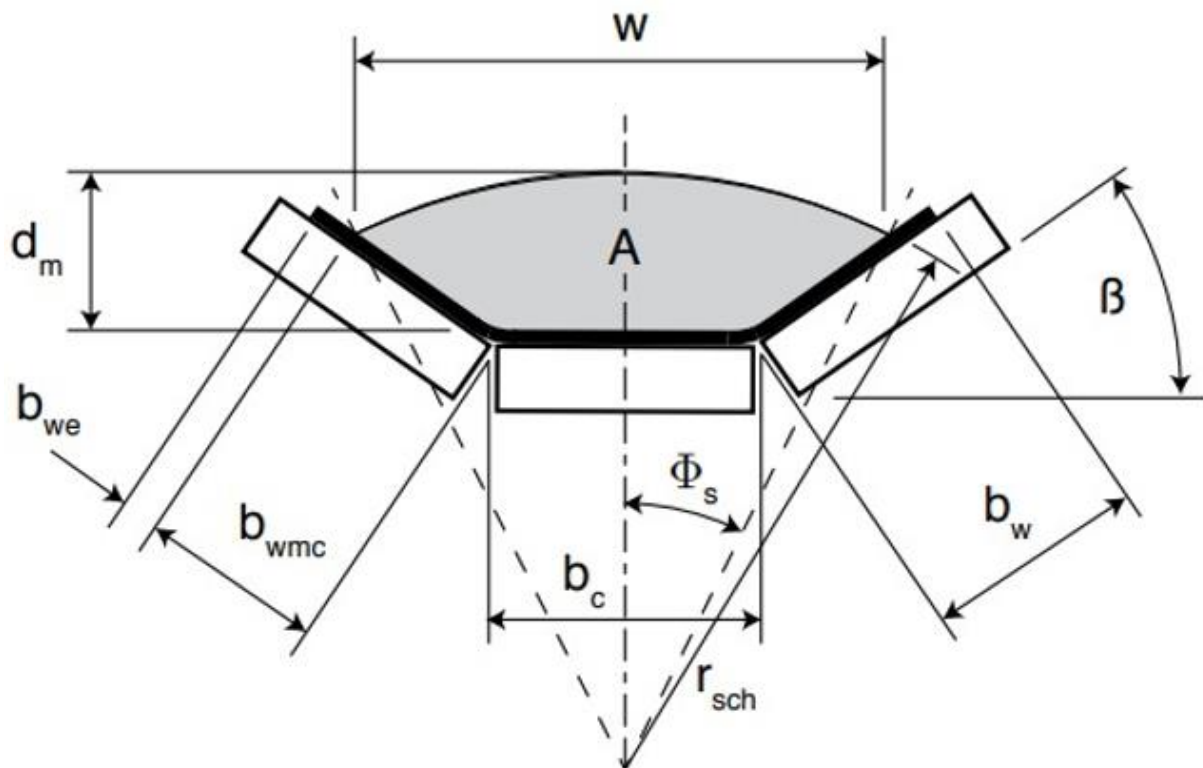
Os carregamentos lineares devidos ao transporte de material na correia podem ser calculados a partir da multiplicação da densidade aparente do material pela área da seção transversal formada pelo material na correia.

Para o cálculo das estruturas dos transportadores de correia, são utilizadas as seguintes condições de enchimento da correia (CEMA, 2014):

- Correia cheia com a menor distância permitida entre o material e a borda, também conhecida como 100% de grau de enchimento ($bwe = bwe_{\text{mínimo}}$). Esta condição é considerada uma ação normal.
- Correia cheia com borda zero ($bwe = 0$). Esta condição é considerada uma ação excepcional.

A Figura 5 representa a seção transversal do material e a nomenclatura utilizada para cálculo da área.

Figura 5: Área da seção transversal CEMA e nomenclatura para cálculo.



Fonte: CEMA, 2014.

Para calcular a área da seção transversal de material para 100% da capacidade de transporte permitida pela CEMA, as seguintes variáveis devem ser utilizadas, conforme descrito na Figura 5:

- BW : largura da correia.
- Φ_s : ângulo de acomodação do material.
- β : ângulo de inclinação dos roletes.
- b_c : razão adimensional entre comprimento do rolete central com três roletes iguais e a largura da correia.

- b_{we} : razão adimensional entre a distância do material à borda e a largura da correia.
- b_w : razão adimensional entre a largura da correia sobre o rolo inclinado e a largura da correia.
- b_{wmc} : razão adimensional entre o comprimento do material no rolo inclinado e a largura da correia.
- r_{sch} : razão adimensional entre o raio da superfície superior do material e a largura da correia.

A área da seção transversal de material com 100% de grau de enchimento CEMA, A_s , e suas variáveis são obtidas pelas seguintes equações para transportadores de três roletes de carga (BW deve ser utilizado em mm e os ângulos devem ser considerados em radianos) (CEMA, 2014):

$$b_c = \frac{0,371BW + 6,35mm}{BW} \quad (1)$$

$$b_{we} = \frac{0,055BW + 22,9mm}{BW} \quad (2)$$

$$b_w = \frac{1 - b_c}{2} \quad (3)$$

$$b_{wmc} = b_w - b_{we} \quad (4)$$

$$r_{sch} = \frac{\frac{b_c}{2}}{\text{sen}(\Phi_s)} + \frac{\cos(\beta) \cdot b_{wmc}}{\text{sen}(\Phi_s)} \quad (5)$$

$$A_s = 2BW^2 \cdot \left(r_{sch}^2 \cdot \left(\frac{\Phi_s}{2} - \frac{\text{sen}(\Phi_s) \cdot \cos(\Phi_s)}{2} \right) + \left(\frac{b_c}{2} \cdot b_{wmc} \cdot \text{sen}(\beta) \right) + b_{wmc}^2 \cdot \frac{\text{sen}(\beta) \cdot \cos(\beta)}{2} \right) \quad (6)$$

Para obter a área da seção transversal da correia para a condição de transbordo (borda 0 mm), a seguinte variável também deve ser determinada:

- r_{schf} : razão adimensional entre o raio da superfície superior do material com borda 0 mm e a largura da correia.

A área da seção transversal com borda 0 mm, A_f , e a variável r_{schf} , são determinadas pelas seguintes equações para transportadores de três roletes de carga (CEMA, 2014):

$$r_{schf} = \frac{(1 - \cos(\beta)) \cdot b_c + \cos(\beta)}{2 \sin(\Phi_s)} \quad (7)$$

$$A_f = 2BW^2 \cdot \left(r_{schf}^2 \cdot \left(\frac{\Phi_s}{2} - \frac{\sin(\Phi_s) \cdot \cos(\Phi_s)}{2} \right) + \left(\frac{b_c}{2} \cdot b_w \cdot \sin(\beta) \right) + b_w^2 \cdot \frac{\sin(\beta) \cdot \cos(\beta)}{2} \right) \quad (8)$$

3.2.2 Ações devidas ao impacto do material na região de transferência

O material transferido de um transportador de correia para outro gera uma ação de impacto que deve ser levada em consideração no dimensionamento das estruturas da região de recebimento. A CEMA (2014) indica duas forças de impacto que devem ser consideradas: o impacto de um único mataco (pedra) e o impacto do fluxo contínuo de material.

As equações a seguir fornecem as forças, em Newtons, de impacto para um único mataco (F_L) e para o fluxo contínuo de material (F_S) (CEMA, 2014).

$$F_L = W + (2 \cdot k \cdot W \cdot H)^{1/2} \quad (9)$$

$$F_S = 1,23 \cdot Q \cdot H^{1/2} \quad (10)$$

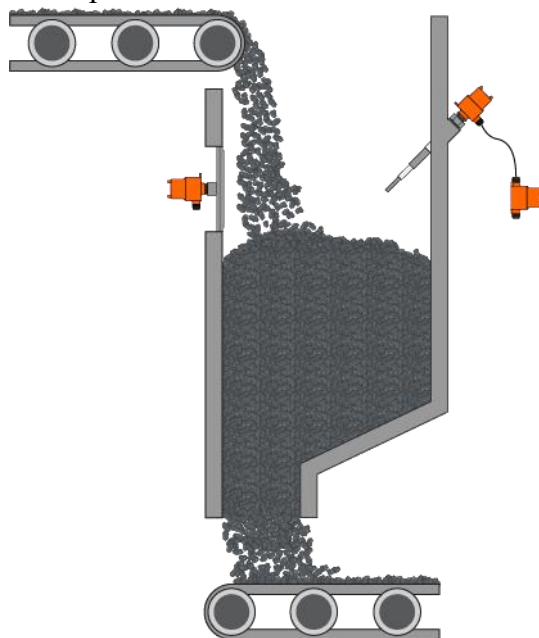
Onde,

- F_L : Força do impacto de um único mataco [N].
- F_S : Força do impacto do fluxo de material [N].
- W : Peso do mataco [N].
- k : Constante de mola do rolete de impacto [N/m].
- H : Altura da queda [m].
- Q : Capacidade de transporte de material [t/h].

3.2.3 Ações devidas ao bloqueio e entupimento de chutes

Em algumas situações, pode ocorrer bloqueio ou entupimento de um ou mais chutes, que pode resultar em acúmulo de material na região da transferência. Em geral, o projeto de chutes conta com sensores de emergência para interrupção do transportador de correia em caso de entupimento dos chutes. Apesar disso, conservadoramente, os projetos estruturais geralmente consideram a situação excepcional de acúmulo de material em todo o volume do chute. A determinação dessa ação é feita com a multiplicação do volume de material acumulado pela densidade do material. Um esquema de chute entupido é mostrado na Figura 6.

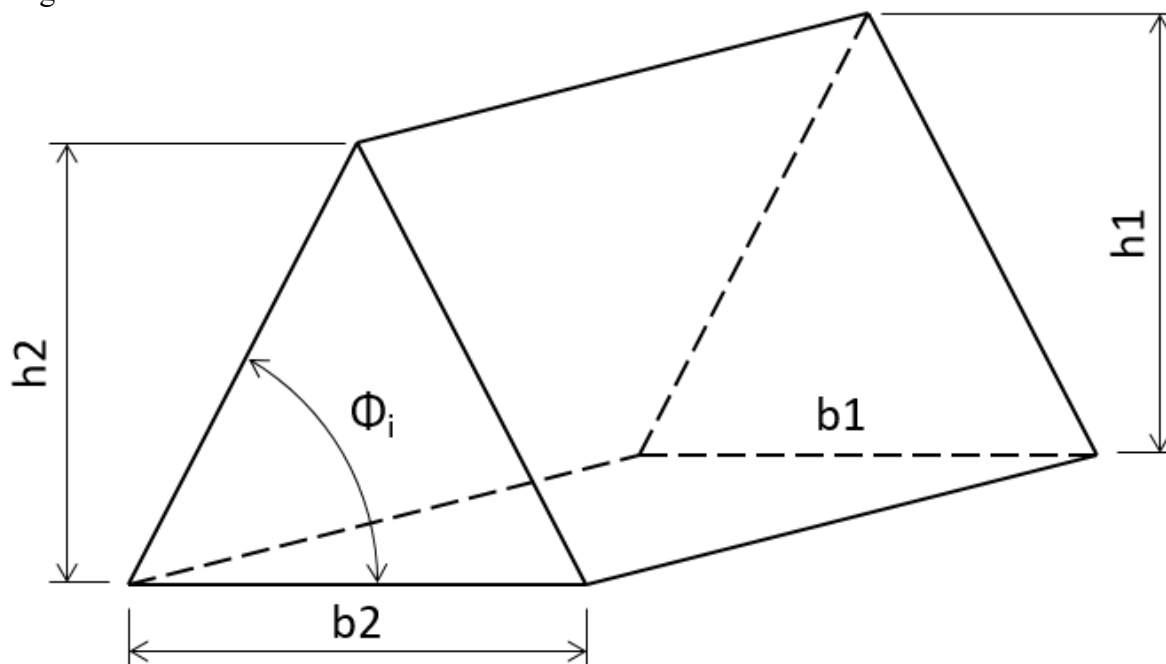
Figura 6: Exemplo de chute entupido.



Fonte: Lince Instrumentos e Radioproteção, 2025.

Além disso, é necessário determinar a parcela de material que será suportada pelo chute e a parcela que será suportada pela mesa de impacto do transportador de correia subsequente. Para estimar a carga que será suportada pela mesa de impacto, é necessário utilizar o ângulo de arqueamento do material, Φ_i , que é o ângulo entre o plano horizontal e o plano que separa as parcelas de material suportadas pelo chute e pelo transportador que recebe o material. A CEMA (2014) recomenda valores conservadores (do ponto de vista da correia de recebimento) entre 70° e 80° para materiais pouco coesos. Para determinar a carga no chute, valores conservadores podem ser obtidos utilizando o ângulo de repouso do material. A Figura 7 mostra a parcela de material a ser suportada pela correia de recebimento (CEMA, 2014).

Figura 7: Parcela de material suportada pela correia de recebimento no entupimento do chute de carga.



Fonte: CEMA, 2014.

Após o bloqueio do chute, é possível que o desbloqueio seja feito ao forçar a partida do transportador de correia que recebe esse material, desde que o acionamento do equipamento tenha capacidade para isso. A força necessária para desbloqueio do chute, que será transferida ao chute de descarga e, conseqüentemente, a seus apoios é dada pela seguinte equação (CEMA, 2014):

$$F_Q = \tan(\Phi_{ai}) \cdot Q_i \quad (11)$$

Onde,

- F_Q : força de partida com o chute cheio.
- Φ_{ai} : ângulo de atrito interno do material.
- Q_i : carga suportada pela correia de recebimento.

3.3 Ações Devidas à Tensão na Correia

Nos transportadores de correia, uma das principais ações a serem levadas em consideração é a tensão na correia exercida sobre os tambores, que é transmitida para a estrutura. De acordo com a CEMA (2014), as forças que atuam na correia podem ser categorizadas da seguinte forma:

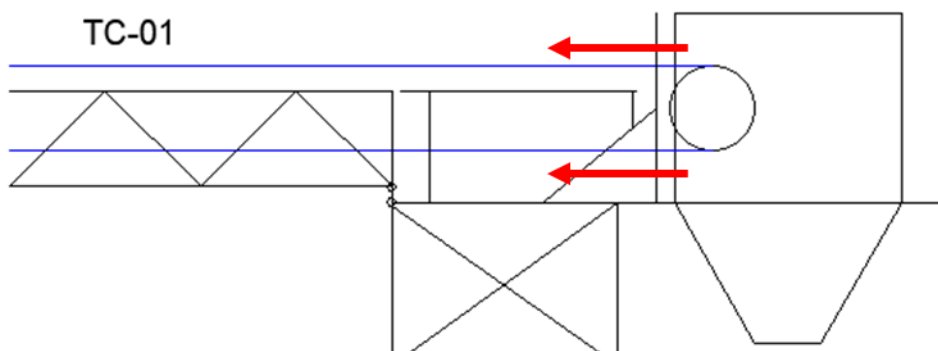
- Trabalho executado na correia por fontes externas, relacionado à energia necessária para acelerar o material à velocidade da correia e para elevar o material. Essa fonte também está relacionada à resistência do transportador de correia e seus componentes.
- Forças inerciais associadas à mudança de velocidade.
- Tensão interna uniforme aplicada à correia, intencionalmente, como pré-tensão.

A tensão na correia varia ao longo do transportador em função do material carregado, da elevação do ponto avaliado e da disposição dos tambores (acionamento, esticamento e desvio). Essa ação é variável para os diversos cenários de uso do equipamento, tais como correia cheia ou vazia, partida do equipamento, parada natural, frenagem de emergência, partida com o chute cheio e travamento acidental da correia.

As tensões na correia podem ser calculadas ao dividir o transportador em uma série de seções. A tensão em qualquer seção é a soma da tensão no final da seção anterior com as várias alterações de tensão ao longo do trecho até a seção avaliada. No processo, é necessário identificar o caminho do material, as condições de carregamento e os componentes do transportador de correia (CEMA, 2014).

Os tambores são locais no transportador onde a correia altera significativamente sua direção em um curto comprimento. Isso faz com que a correia tenha um ângulo de abraçamento considerável com os tambores e, assim, uma resultante das forças de tensão na correia deve ser suportada pelos tambores, seus mancais e, por consequência, pela estrutura suporte. As forças devidas às tensões na correia são mostradas com setas vermelhas na Figura 8.

Figura 8: Forças devidas às tensões na correia.



Fonte: Elaboração própria.

3.4 Ações de Vento

A ABNT NBR 6123:2023 é a norma brasileira que define as forças devidas ao vento em edificações. Para determinar a força que o vento exerce em uma edificação, é necessário definir a pressão dinâmica do vento (q), a área da superfície onde o vento incide (A) e os coeficientes de forma ou de pressão da superfície, ou coeficientes de força aplicados em um corpo (ABNT NBR 6123, 2023).

Para determinar a pressão dinâmica do vento, é necessário utilizar o mapa de isopletas, conforme a Figura 9, que define a velocidade básica do vento (V_0), em m/s, a ser utilizada em cada região do Brasil.

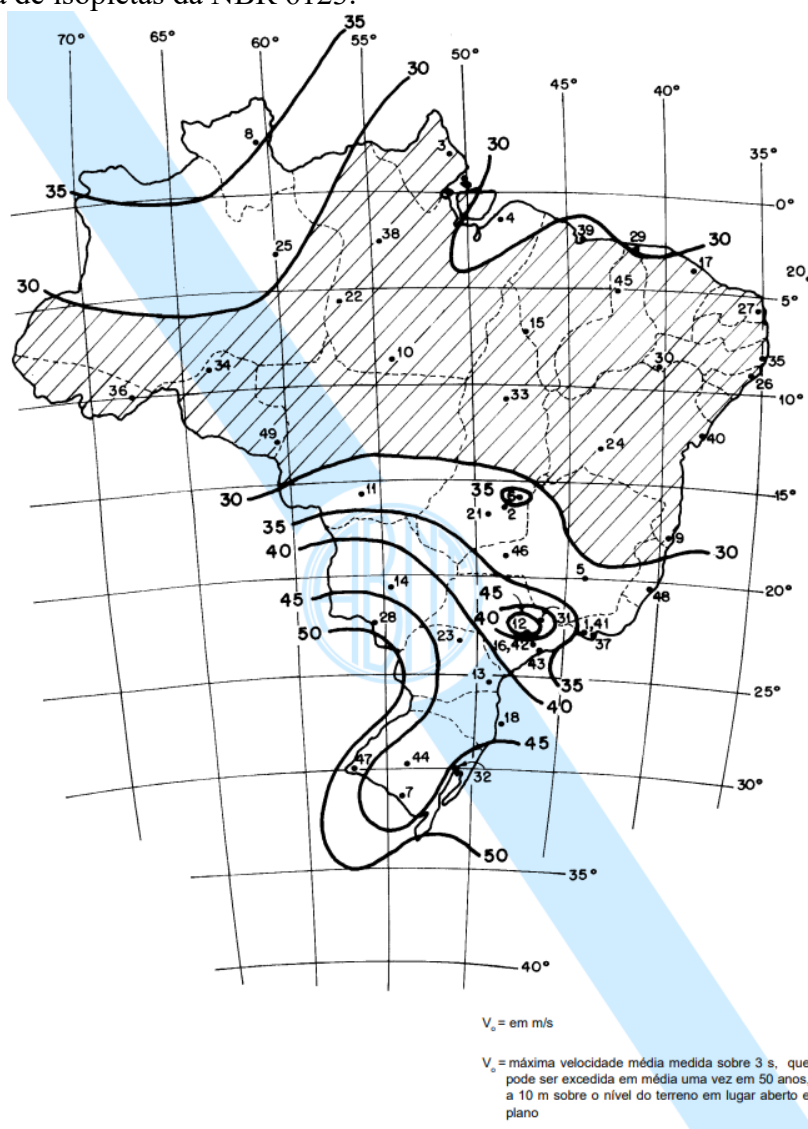
Uma vez definida a velocidade básica do vento, a velocidade característica do vento (V_k) é determinada, em m/s, ao multiplicar a velocidade básica do vento pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 (ver equação (12)), que podem ser descritos da seguinte maneira (ABNT NBR 6123, 2023):

- S_1 (fator topográfico): é o fator que considera as variações do relevo do terreno. Esse fator tem o valor de 1,0 para terrenos planos ou fracamente acidentados e pode adotar valores maiores em regiões de taludes e morros. Quando a estrutura se encontra em vales profundos, protegidos de vento em qualquer direção, é permitido adotar um fator S_1 de 0,9.

- S_2 (fator de rugosidade do terreno): é o fator que considera os efeitos da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte dela. O fator S_2 é definido conforme a categoria do terreno (definida pelos obstáculos próximos à estrutura) e a classe da estrutura (definida pela maior dimensão da estrutura frontal ao vento).
- S_3 (fator estatístico): é o fator que considera os conceitos estatísticos do cálculo da ação do vento na estrutura com base no grau de segurança requerido na estrutura e sua vida útil. A condição padrão da norma para edificações de hotéis, residências, comércios e indústrias com alto fator de segurança é representada por uma velocidade de vento com período de recorrência de 50 anos e probabilidade de 63% de ser igualada ou excedida nesse período. Para essas condições, o fator S_3 é 1,0.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (12)$$

Figura 9: Mapa de isopletas da NBR 6123.



Fonte: ANBT NBR 6123:2023.

Por fim, a pressão dinâmica (q) é determinada, em N/m^2 , pela equação (13), a seguir (ABNT NBR 6123, 2023).

$$q = 0,613V_k^2 \quad (13)$$

Os coeficientes de forma são determinados conforme as características das superfícies que sofrem as ações do vento. Para determinar seus valores, a NBR 6123 traz diversas tabelas e equações. Para vento em perfis estruturais (barras prismáticas), os coeficientes de força são definidos, conforme cada perfil e direção do vento na Tabela 12 da NBR 6123:2023.

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

4.1 Metodologia

A análise estrutural da casa de transferência estudada neste documento foi feita utilizando o software Robot Structural Analysis Professional 2024 da Autodesk. Os esforços solicitantes na estrutura foram determinados, neste software, utilizando o método dos elementos finitos.

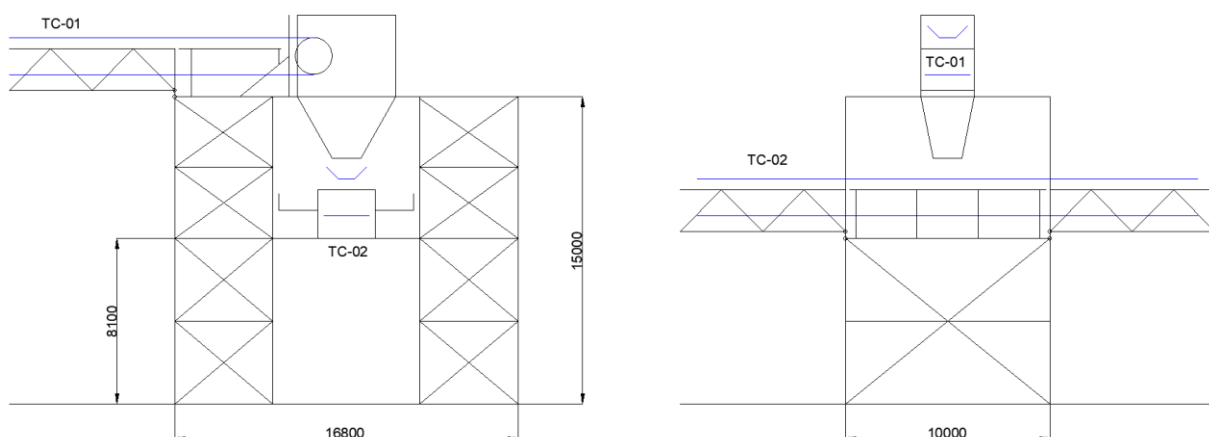
Para a verificação normativa dos estados-limites últimos dos perfis de aço utilizados na estrutura, a ABNT NBR 8800:2008 foi aplicada pelo software. Os estados-limites de serviço também foram verificados conforme os limites apresentados nesta norma. A versão atualizada desta norma, de 2024, ainda não está incluída no software. Por simplicidade, o dimensionamento das ligações metálicas não será abordado nesse estudo.

4.2 Definição da Estrutura

A estrutura proposta neste estudo é uma estrutura fictícia de casa de transferência para transportadores de correia, localizada na região nordeste de Minas Gerais. Para o projeto estrutural da casa de transferência foram definidas dimensões aproximadas de 16,8m x 10m x 15m (comprimento, largura e altura, respectivamente). A estrutura não deve ter tapamento ou cobertura.

A casa de transferência será a região onde um transportador de correia, denominado TC-01, irá transferir o material para um segundo transportador de correia, denominado TC-02, utilizando um chute. O esquema da casa de transferência é mostrado na Figura 10.

Figura 10: Esquema da casa de transferência.



Fonte: Elaboração própria.

Neste estudo, considera-se que o projeto dos transportadores de correia já foi desenvolvido. Logo, as cargas provenientes de sua operação são dados de entrada fornecidos por terceiros. Ambos os transportadores suportados pela estrutura da casa de transferência terão as seguintes especificações:

- Material transportado: minério de ferro.
- Capacidade nominal: 18000 t/h.
- Capacidade de projeto: 21000 t/h.
- Largura da correia: 2200 mm.
- Velocidade da correia: 5 m/s.
- Inclinação dos roletes na região desenvolvida: 45°.
- Densidade aparente do material para cálculo estrutural: 2,6 t/m³.
- Ângulo de repouso do material: 20°.
- Ângulo de acomodação do material: 38°.
- Ângulo de atrito interno do material: 52°.
- Ângulo de arqueamento do material: 70°.
- Granulometria máxima transportada: 300 mm.

- Treliças de massa linear de 2 t/m e comprimento de 30 m.
- Largura dos passadiços da treliça: 1700 mm.
- Tensão de correia de operação no tambor de descarga: $T1 = T2 = 1900 \text{ kN}$.
- Tensão de correia excepcional no tambor de descarga: $T1 = T2 = 2300 \text{ kN}$.

4.3 Ações e Combinações de Ações

Para o cálculo estrutural da casa de transferência abordada neste estudo, foram definidas ações a serem consideradas a partir da operação prevista para os transportadores, bem como ações excepcionais para situações acidentais. As ações consideradas no cálculo são listadas na Tabela 1 com seu símbolo.

Tabela 1: Ações consideradas no cálculo da estrutura.

Ação	Símbolo
Peso próprio da estrutura	CP
Carga permanente de componentes e equipamentos	CPE
Sobrecarga operacional de material	SCM1
Sobrecarga excepcional de material	SCM2
Partida com o chute cheio	PC
Sobrecargas em plataformas	SCP
Tensões de correia de operação	TC1
Tensões de correia excepcionais	TC2
Efeitos de variação na temperatura	ET
Vento na direção X	VTX
Vento na direção Y	VTY

Fonte: Elaboração própria.

As combinações das ações foram feitas conforme definido na ABNT NBR 8800:2008 para estados-limite últimos e de serviço. As combinações utilizadas são descritas na Tabela 2. As combinações são classificadas em ELU (estado-limite último) e ELS (estado-limite de serviço).

Tabela 2: Combinações de ações (continua).

Tipo	Combinação	Descrição
ELU	C1	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1
ELU	C2	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,5TC1
ELU	C3	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,5SCP+1,05TC1
ELU	C4	1CP+1CPE+1,4VTY+0,72ET
ELU	C5	1CP+1CPE+0,84VTY+1,2ET
ELU	C6	1CP+1CPE+1,4VTY-0,72ET
ELU	C7	1CP+1CPE+0,84VTY-1,2ET
ELU	C8	1CP+1CPE-1,4VTY+0,72ET
ELU	C9	1CP+1CPE-0,84VTY+1,2ET
ELU	C10	1CP+1CPE-1,4VTY-0,72ET
ELU	C11	1CP+1CPE-0,84VTY-1,2ET
ELU	C12	1CP+1CPE+1,4VYX+0,72ET
ELU	C13	1CP+1CPE+0,84VYX+1,2ET
ELU	C14	1CP+1CPE+1,4VYX-0,72ET
ELU	C15	1CP+1CPE+0,84VYX-1,2ET
ELU	C16	1CP+1CPE-1,4VYX+0,72ET
ELU	C17	1CP+1CPE-0,84VYX+1,2ET
ELU	C18	1CP+1CPE-1,4VYX-0,72ET
ELU	C19	1CP+1CPE-0,84VYX-1,2ET
ELU	C20	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTY+0,72ET
ELU	C21	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+1,4VTY+0,72ET
ELU	C22	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTY+1,2ET
ELU	C23	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTY-0,72ET
ELU	C24	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+1,4VTY-0,72ET
ELU	C25	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTY-1,2ET
ELU	C26	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTY+0,72ET

Tabela 2: Combinações de ações (continuação).

Tipo	Combinação	Descrição
ELU	C27	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-1,4VTY+0,72ET
ELU	C28	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTY+1,2ET
ELU	C29	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTY-0,72ET
ELU	C30	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-1,4VTY-0,72ET
ELU	C31	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTY-1,2ET
ELU	C32	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTX+0,72ET
ELU	C33	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+1,4VTX+0,72ET
ELU	C34	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTX+1,2ET
ELU	C35	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTX-0,72ET
ELU	C36	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+1,4VTX-0,72ET
ELU	C37	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1+0,84VTX-1,2ET
ELU	C38	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTX+0,72ET
ELU	C39	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-1,4VTX+0,72ET
ELU	C40	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTX+1,2ET
ELU	C41	1,25CP+1,5CPE+1,5SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTX-0,72ET
ELU	C42	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-1,4VTX-0,72ET
ELU	C43	1,25CP+1,5CPE+1,05SCM1+1,05SCP+1,05TC1-0,84VTX-1,2ET
ELU	C44	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTY+0,72ET
ELU	C45	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+1,4VTY+0,72ET
ELU	C46	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTY+1,2ET
ELU	C47	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTY-0,72ET
ELU	C48	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+1,4VTY-0,72ET
ELU	C49	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTY-1,2ET
ELU	C50	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTY+0,72ET
ELU	C51	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-1,4VTY+0,72ET
ELU	C52	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTY+1,2ET

Tabela 2: Combinações de ações (continuação).

Tipo	Combinação	Descrição
ELU	C53	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTY-0,72ET
ELU	C54	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-1,4VTY-0,72ET
ELU	C55	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTY-1,2ET
ELU	C56	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTX+0,72ET
ELU	C57	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+1,4VTX+0,72ET
ELU	C58	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTX+1,2ET
ELU	C59	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTX-0,72ET
ELU	C60	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+1,4VTX-0,72ET
ELU	C61	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1+0,84VTX-1,2ET
ELU	C62	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTX+0,72ET
ELU	C63	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-1,4VTX+0,72ET
ELU	C64	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTX+1,2ET
ELU	C65	1,25CP+1,5CPE+1,5TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTX-0,72ET
ELU	C66	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-1,4VTX-0,72ET
ELU	C67	1,25CP+1,5CPE+1,05TC1+1,05SCP+1,05SCM1-0,84VTX-1,2ET
ELU	C68	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTY+0,72ET
ELU	C69	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+1,4VTY+0,72ET
ELU	C70	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTY+1,2ET
ELU	C71	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTY-0,72ET
ELU	C72	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+1,4VTY-0,72ET
ELU	C73	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTY-1,2ET
ELU	C74	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTY+0,72ET
ELU	C75	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-1,4VTY+0,72ET
ELU	C76	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTY+1,2ET
ELU	C77	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTY-0,72ET

Tabela 2: Combinações de ações (continuação).

Tipo	Combinação	Descrição
ELU	C78	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-1,4VTY-0,72ET
ELU	C79	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTY-1,2ET
ELU	C80	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTX+0,72ET
ELU	C81	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+1,4VTX+0,72ET
ELU	C82	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTX+1,2ET
ELU	C83	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTX-0,72ET
ELU	C84	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+1,4VTX-0,72ET
ELU	C85	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1+0,84VTX-1,2ET
ELU	C86	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTX+0,72ET
ELU	C87	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-1,4VTX+0,72ET
ELU	C88	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTX+1,2ET
ELU	C89	1,25CP+1,5CPE+1,5SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTX-0,72ET
ELU	C90	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-1,4VTX-0,72ET
ELU	C91	1,25CP+1,5CPE+1,05SCP+1,05SCM1+1,05TC1-0,84VTX-1,2ET
ELU	C92	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTY+0,6ET
ELU	C93	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTY-0,6ET
ELU	C94	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTY+0,6ET
ELU	C95	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTY-0,6ET
ELU	C96	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTX+0,6ET
ELU	C97	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTX-0,6ET
ELU	C98	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTX+0,6ET
ELU	C99	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTX-0,6ET
ELU	C100	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTY+0,6ET+1PC
ELU	C101	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1+0,6VTY+0,6ET+1PC

Tabela 2: Combinações de ações (continuação).

Tipo	Combinação	Descrição
ELU	C102	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTY-0,6ET+1PC
ELU	C103	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1+0,6VTY-0,6ET+1PC
ELU	C104	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTY+0,6ET+1PC
ELU	C105	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1-0,6VTY+0,6ET+1PC
ELU	C106	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTY-0,6ET+1PC
ELU	C107	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1-0,6VTY-0,6ET+1PC
ELU	C108	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTX+0,6ET+1PC
ELU	C109	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1+0,6VTX+0,6ET+1PC
ELU	C110	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1+0,6VTX-0,6ET+1PC
ELU	C111	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1+0,6VTX-0,6ET+1PC
ELU	C112	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTX+0,6ET+1PC
ELU	C113	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1-0,6VTX+0,6ET+1PC
ELU	C114	1,1CP+1,3CPE+1SCM2+0,7SCP+0,7TC1-0,6VTX-0,6ET+1PC
ELU	C115	1CP+1CPE+0,7SCM2+0SCP+0,7TC1-0,6VTX-0,6ET+1PC
ELU	C116	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2+0,6VTY+0,6ET
ELU	C117	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2+0,6VTY-0,6ET
ELU	C118	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2-0,6VTY+0,6ET
ELU	C119	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2-0,6VTY-0,6ET
ELU	C120	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2+0,6VTX+0,6ET
ELU	C121	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2+0,6VTX-0,6ET
ELU	C122	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2-0,6VTX+0,6ET
ELU	C123	1,1CP+1,3CPE+0,7SCM1+0,7SCP+1TC2-0,6VTX-0,6ET
ELS	C124	1CP+1CPE+0,6SCM1+0,4SCP+0,4TC1
ELS	C125	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,4SCP+0,6TC1

Tabela 2: Combinações de ações (continuação).

Tipo	Combinação	Descrição
ELS	C126	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,6SCP+0,4TC1
ELS	C127	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,4SCP+0,4TC1+0,3VTY
ELS	C128	1CP+1CPE+0,3VTY
ELS	C129	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,4SCP+0,4TC1-0,3VTY
ELS	C130	1CP+1CPE-0,3VTY
ELS	C131	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,4SCP+0,4TC1+0,3VYX
ELS	C132	1CP+1CPE+0,3VYX
ELS	C133	1CP+1CPE+0,4SCM1+0,4SCP+0,4TC1-0,3VYX
ELS	C134	1CP+1CPE-0,3VYX

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1 Cálculo das ações

Neste item é detalhado o cálculo das ações aplicadas à estrutura projetada.

4.3.1.1 Cargas permanentes (CP e CPE)

A Tabela 3 resume as ações permanentes consideradas no modelo.

O peso da estrutura metálica foi extraído diretamente do software de cálculo utilizado. Essa carga é aplicada automaticamente pelo programa como uma carga de corpo nos elementos de pórtico.

Já as demais ações permanentes foram estimadas a partir de projetos reais de transportadores de correia com capacidade e geometria semelhantes ao proposto nesse projeto. Sua aplicação foi feita com cargas nodais ou distribuídas nos elementos de pórtico, conforme a natureza de cada ação

Tabela 3: Cargas permanentes aplicadas no modelo.

Descrição	Valor [kN]
Estrutura metálica	915
Treliça TC-01	294
Longarina TC-01	59
Conjunto do tambor de descarga do TC-01	441
Suporte do tambor de descarga do TC-01	98
Chute de descarga do TC-01	392
Pisos da CT (28 kgf/m ²)	41
Mesa de impacto TC-02	294
Treliças (2) TC-02	588
Total	3122

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1.2 Sobrecargas de material (SCM1 e SCM2) e partida com o chute cheio (PC)

As ações de sobrecargas de material atuantes na estrutura foram calculadas para carga linear de material nas treliças e longarinas, carga de impacto de material na mesa de impacto e cargas de entupimento de chute conforme o critério definido pela CEMA (2014).

Os parâmetros considerados para definir as sobrecargas de material operacional (SCM1), bem como os valores finais obtidos, são mostrados na Tabela 4. Esses valores consideram o transporte de material com a maior capacidade permitida pela CEMA e o impacto de material na mesa de impacto do TC-02.

Tabela 4: Sobrecargas operacionais de material consideradas no modelo (SCM1).

Descrição	Valor
Largura da correia	2200 mm
Ângulo de acomodação do material	20°
Inclinação dos roletes	45°
Densidade aparente do material	2600 kg/m ³
Granulometria máxima do material	300 mm
Fluxo de material (100% CEMA)	28800 t/h
Altura de queda	6,9 m
Força de impacto na mesa de impacto (TC-02)	297 kN
Peso linear de minério para capacidade 100% CEMA	17,3 kN/m
Fator dinâmico	10%
Fator de incrustação	10%
SCM1 – Treliça 1 – TC-01 (metade)	282 kN
SCM1 – Longarina – TC-01	94 kN
SCM1 – Mesa de impacto – TC-02	438 kN
SCM1 – Treliça 2 – TC-02 (metade)	282 kN
SCM1 Total	1096 kN

Fonte: Elaboração própria.

Os valores considerados no modelo para sobrecargas acidentais de material são mostrados na Tabela 5 e compreendem as correias transportando material com borda 0 mm e o chute entupido. Esses valores foram calculados conforme a metodologia proposta pela CEMA, apresentada na seção 3.2 deste documento. As cargas foram aplicadas no modelo como cargas nodais nos pontos de fixação das treliças, longarinas e chute. Destaca-se que, como a casa de transferência suporta somente metade do carregamento das treliças, apenas essa parcela foi aplicada no modelo.

Tabela 5: Sobrecargas acidentais de material consideradas no modelo (SCM2).

Descrição	Valor
Peso linear de minério para borda 0 mm	23,2 kN/m
Fator dinâmico	10%
Fator de incrustação	10%
Volume total do chute	57,9 m ³
SCM2 – Treliça 1 – TC-01 (metade)	372 kN
SCM2 – Longarina – TC-01	124 kN
SCM2 – Mesa de impacto – TC-02	282 kN
SCM2 – Treliça 2 – TC-02 (metade)	372 kN
SCM2 – Suportes do chute de descarga	1379 kN
SCM2 Total	2529 kN

Fonte: Elaboração própria.

No caso de um entupimento de chute, é possível que seja tentada a desobstrução desse chute ao forçar a partida do transportador TC-02. Essa operação traz à casa de transferência novas cargas causadas pela resistência que o chute irá apresentar ao movimento do material. Destaca-se que a força do TC-02 partindo com o chute cheio ocorre na saída do chute, que só é apoiado na elevação superior da casa de transferência. Com isso, um momento fletor é gerado no chute e transferido à estrutura de suporte. Os dados para o cálculo desses valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Ações de partida com o chute cheio (PC).

Descrição	Valor
Peso de material sobre a mesa de impacto	96 kN
Ângulo de atrito interno do material	52°
Força horizontal de partida com o chute cheio	123 kN
Momento fletor gerado no chute	396 kNm

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1.3 Sobrecargas em plataformas (SCP)

As sobrecargas em pisos aplicadas à estrutura correspondem às recomendações da AISE Technical Report No. 13 para pisos de transportadores de correia ($75 \text{ psf} = 3,6 \text{ kN/m}^2$). A sobrecarga foi aplicada como carga distribuída sobre as vigas. A Tabela 7 mostra as sobrecargas em plataformas aplicadas ao modelo.

Tabela 7: Ações de sobrecargas em plataformas.

Descrição	Valor [kN]
Treliça TC-01	183
Mesa de impacto TC-02	122
Treliças 1 e 2 TC-02	366
Pisos da CT	531
SCP Total	1202

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1.4 Tensões de correia (TC1 e TC2)

As tensões de correia consideradas para o tambor de descarga do TC-01 são mostradas na Tabela 8. As tensões de correia de operação correspondem às ações máximas esperadas durante a operação normal do ativo, como em partidas ou frenagens. Já as tensões de correia excepcionais são relativas a alguma ação acidental como travamento da correia e partida com o chute cheio. As ações de tensão de correia foram aplicadas como cargas nodais nos nós correspondentes às bases do suporte do tambor de descarga do TC-01.

Tabela 8: Tensões de correia aplicadas ao modelo

Descrição	Valor (T1+T2) [kN]
Tensões de correia de operação (TC1)	3800
Tensões de correia excepcionais (TC2)	4600

Fonte: Elaboração própria.

4.3.1.5 Ações devidas ao efeito da variação de temperatura (ET)

Para critério de cálculo, considera-se que a estrutura estará exposta à insolação direta e, por isso, uma variação de temperatura de ± 20 °C foi adotada como critério de cálculo.

4.3.1.6 Ações devidas ao vento (VT)

Neste estudo, considera-se que a estrutura fictícia está localizada na região nordeste de Minas Gerais. Conforme a ABNT NBR 6123:2023, a velocidade básica do vento para essa região é de 30 m/s. A casa de transferência é considerada sem tapamento ou cobertura, assim como as treliças dos transportadores. O vento calculado para a estrutura considera os reticulados das estruturas metálicas da CT e dos transportadores de correia, assim como o vento incidente no chute de descarga.

Neste estudo, considera-se que o terreno é plano. A estrutura foi avaliada considerando a categoria II e classe A da norma. Além disso, considera-se que esta é uma edificação industrial com baixo fator de ocupação. O vento foi aplicado na estrutura em suas quatro direções principais. As ações de vento foram aplicadas às vigas e pilares como carga distribuída nos elementos de pórtico. A Tabela 9 mostra as variáveis adotadas para o cálculo de vento na estrutura.

Tabela 9: Vento aplicado na casa de transferência.

Descrição	Valor
Velocidade básica do vento (V_0)	30 m/s
Fator topográfico (S_1)	1,00
Parâmetro meteorológico (b)	1,00
Fator de rajada (F_r)	1,00
Expoente da lei potencial (p)	0,085
Altura (z)	15 m
Fator de rugosidade do terreno (S_2)	1,04
Fator estatístico (S_3)	0,95
Velocidade característica do vento (V_k)	29,5 m/s
Pressão dinâmica do vento (q)	533,4 Pa

Fonte: Elaboração própria.

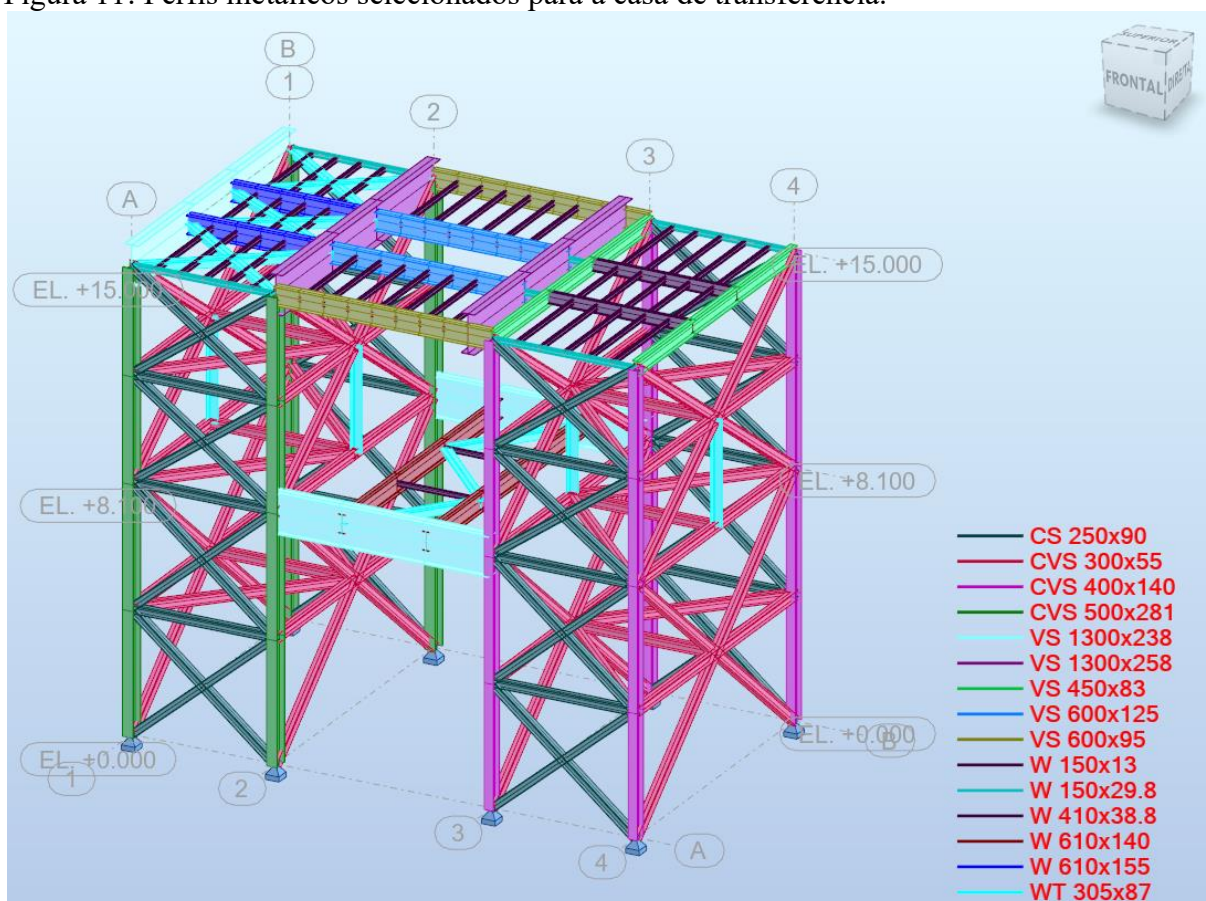
4.4 Resultados

Neste capítulo será apresentada a estrutura da casa de transferência com a configuração final após diversas verificações de estados-limites últimos e de serviço até a aprovação completa do projeto.

4.4.1 Perfis metálicos selecionados

Após as análises, a estrutura final da casa de transferência foi dimensionada com os perfis metálicos apresentados na Figura 11. Todos os perfis laminados foram selecionados conforme o catálogo da Gerdau (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2017). Os perfis soldados foram selecionados conforme a ABNT NBR 5884:2005. O material de todas as barras é o ASTM A-572 Gr. 50. A estrutura final apresenta massa total de, aproximadamente, 100,3 toneladas.

Figura 11: Perfis metálicos seleccionados para a casa de transferência.



Fonte: Elaboração própria.

4.4.2 Deslocabilidade

Para atender aos requisitos da ABNT NBR 8800:2008, a classificação da estrutura quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais foi verificada. Conforme a norma, as estruturas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Pequena deslocabilidade: Estruturas em que a relação entre o deslocamento lateral de um andar obtido em análise de segunda ordem e o mesmo deslocamento obtido em análise de primeira ordem for igual ou inferior a 1,1 para todas as combinações.

- Média deslocabilidade: estruturas em que a maior razão de deslocamento lateral de um andar entre análises de primeira e segunda ordem for superior a 1,1 e igual ou inferior a 1,4.
- Grande deslocabilidade: estruturas em que a máxima relação entre deslocamento lateral de um andar entre análises de primeira e segunda ordem for superior a 1,4.

Para classificar a casa de transferência, foram utilizados os nós dos pilares em cada uma das elevações onde os transportadores de correia são apoiados. A maior razão de deslocamento lateral para um andar, considerando todas as combinações, foi de 1,16. Portanto, a estrutura deste projeto foi classificada como de média deslocabilidade.

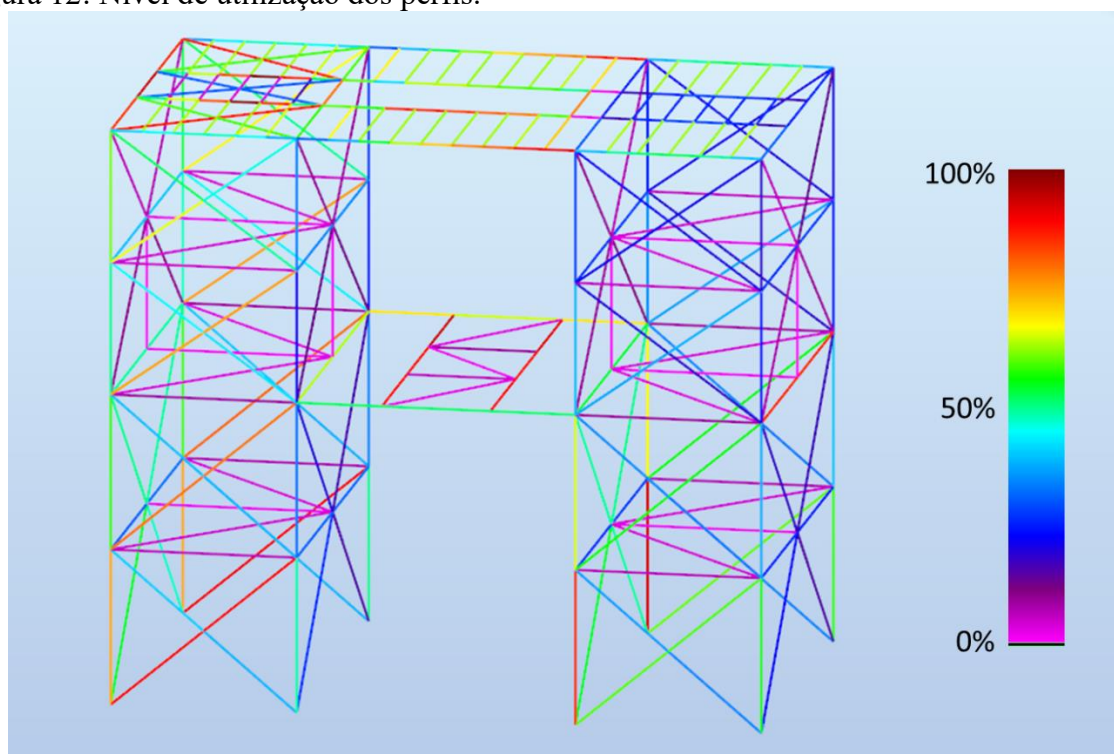
4.4.3 Dimensionamento dos perfis metálicos com base na análise estática

A resistência de cálculo necessária dos perfis foi calculada com base nas combinações de ações de cálculo para estados-limites últimos, indicadas na Tabela 2. Nessa verificação foi realizada uma análise elástica de segunda ordem, conforme previsto na ABNT NBR 8800:2008.

O nível de utilização dos perfis após verificação normativa aplicada pelo *software* adotado é mostrado na Figura 12.

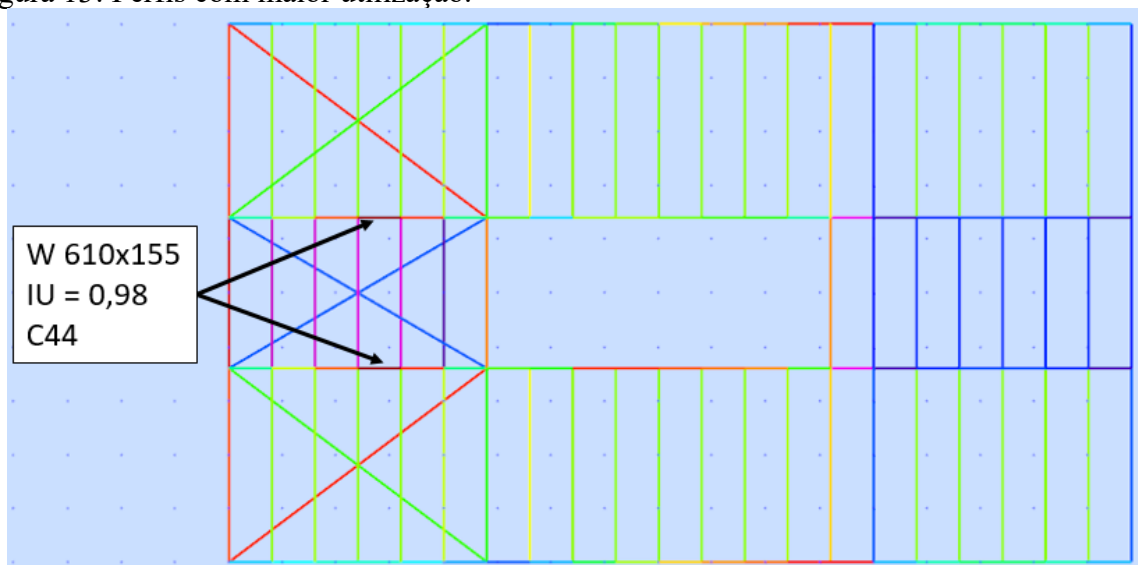
As barras com as maiores utilizações são as vigas da elevação +15.000 em que o suporte do tambor de descarga é apoiado. O perfil dessas vigas é o W 610x155 com a maior utilização, de 98%, observada na combinação C44 (ver Tabela 2) de tensão de correia operacional. As vigas mencionadas são destacadas na Figura 13.

Figura 12: Nível de utilização dos perfis.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13: Perfis com maior utilização.



Fonte: Elaboração própria.

4.4.4 Análise de deslocamentos da estrutura

Os deslocamentos calculados para a estrutura nas combinações frequentes de estados-limites de serviço, indicadas na Tabela 2, foram confrontados com os limites admissíveis previstos no Anexo C da ABNT NBR 8800:2008.

Para os pilares, foi admitido um deslocamento horizontal máximo equivalente a $H/400$, sendo H a altura total do pilar. Para as vigas, foi admitida uma flecha máxima de $L/350$, sendo L o vão da viga.

A Tabela 10 resume os deslocamentos calculados dos pilares e das vigas da casa de transferência nas combinações avaliadas.

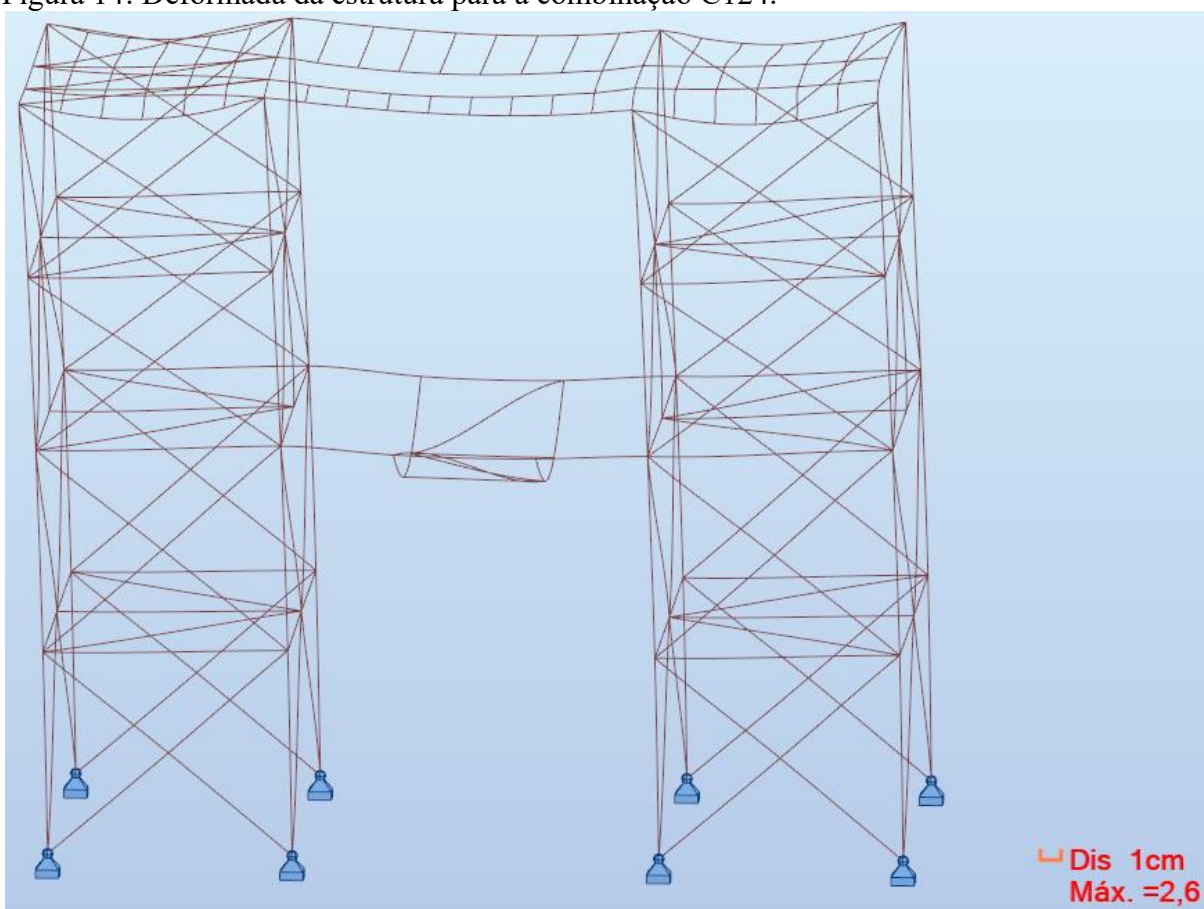
A deformada da estrutura para a combinação C124 de operação normal é mostrada na Figura 14.

Tabela 10: Deslocamentos máximos – Casa de transferência.

Barra	Comprimento	Deslocamento admissível	Deslocamento calculado	Combinação	F.S
Pilar A-1	1500,0 cm	3,8 cm	-1,6 cm	C125	2,34
Pilar A-2	1500,0 cm	3,8 cm	-1,6 cm	C125	2,34
Pilar A-3	1500,0 cm	3,8 cm	-1,5 cm	C125	2,50
Pilar A-4	1500,0 cm	3,8 cm	-1,4 cm	C125	2,68
Pilar B-1	1500,0 cm	3,8 cm	-1,6 cm	C125	2,34
Pilar B-2	1500,0 cm	3,8 cm	-1,6 cm	C125	2,34
Pilar B-3	1500,0 cm	3,8 cm	-1,5 cm	C125	2,50
Pilar B-4	1500,0 cm	3,8 cm	-1,4 cm	C125	2,68
Viga EL 15000 Eixo 1	1000,0 cm	2,9 cm	-0,9 cm	C125	3,17
Viga EL 15000 Eixo 2	1000,0 cm	2,9 cm	-0,5 cm	C130	5,71
Viga EL 15000 Eixo 3	1000,0 cm	2,9 cm	-1,1 cm	C126	2,60
Viga EL 15000 Eixo 4	1000,0 cm	2,9 cm	-0,7 cm	C126	4,08
Viga EL 15000 A-1/2	480,0 cm	1,4 cm	-1,1 cm	C126	1,25
Viga EL 15000 A-2/3	720,0 cm	2,1 cm	-0,6 cm	C126	3,43
Viga EL 15000 A-3/4	480,0 cm	1,4 cm	-1,1 cm	C126	1,25
Viga EL 15000 B-1/2	480,0 cm	1,4 cm	-1,1 cm	C126	1,25
Viga EL 15000 B-2/3	720,0 cm	2,1 cm	0,6 cm	C126	3,43
Viga EL 15000 B-3/4	480,0 cm	1,4 cm	-1,1 cm	C126	1,25
Vigas EL 15000 longarina	480,0 cm	1,4 cm	-0,9 cm	C125	1,52
Vigas EL 15000 chute long	640,0 cm	1,8 cm	-1,2 cm	C128	1,52
Vigas EL 15000 chute transv	1000,0 cm	2,9 cm	-0,8 cm	C124	3,57
Vigas EL 15000 piso 3/4	480,0 cm	1,4 cm	-1,2 cm	C126	1,14
Viga EL 8100 A-2/3	720,0 cm	2,1 cm	-0,4 cm	C124	5,14
Viga EL 8100 B-2/3	720,0 cm	2,1 cm	-0,7 cm	C124	2,94
Vigas EL 8100 mesa imp	1000,0 cm	2,9 cm	-2,3 cm	C124	1,24

Fonte: Elaboração própria.

Figura 14: Deformada da estrutura para a combinação C124.



Fonte: Elaboração própria.

4.4.5 Análise modal da estrutura

A estrutura projetada foi avaliada em uma análise de autovalores para determinar seus principais modos naturais de vibração. As frequências dos modos naturais da estrutura foram, então, comparadas com as frequências de excitação conhecidas para a casa de transferência para indicar ou descartar a necessidade de uma análise dinâmica.

As fontes conhecidas para a casa de transferência que podem resultar em efeitos dinâmicos na estrutura são: a ação do vento, o possível desbalanceamento do tambor de descarga do TC-01, fluxo do material sobre os roletes de carga dos transportadores de correia e a variação das forças

de tensão na correia. Destaca-se que não será verificada a vibração devida ao impacto do caminhar de pessoas, por se tratar de um edifício industrial e de baixa ocupação.

Para que a estrutura não apresente efeitos dinâmicos relevantes devidos à turbulência atmosférica, a ABNT NBR 6123:2023 define que a estrutura deve ter período fundamental igual ou inferior a 1 s (frequência natural superior a 1 Hz). Desde que essa condição seja atendida, a norma indica que os efeitos da resposta flutuante já são consideradas na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S_2 .

O desbalanceamento do tambor é capaz de induzir uma excitação harmônica na estrutura com frequência (f_{tambor}) dada, em Hz, pela equação abaixo. “V” é a velocidade da correia, em m/s, e “D” é o diâmetro do tambor, em m.

$$f_{\text{tambor}} = \frac{V}{\pi D} \quad (14)$$

Para a velocidade de correia de 5 m/s e um tambor com diâmetro de 1,8 m, a frequência calculada para as forças oriundas do desbalanceamento do tambor é de 0,88 Hz.

Caso o transporte de material forme porções irregulares de material sobre a correia, a passagem dessas porções com massas diferentes pelos roletes pode gerar ações dinâmicas na estrutura. A frequência dessas ações é determinada pela equação a seguir, sendo “V” a velocidade da correia, em m/s, e “e” o espaçamento entre roletes de carga.

$$f_{\text{transporte}} = \frac{V}{e} \quad (15)$$

Para a velocidade de correia de 5 m/s e espaçamento de roletes de carga de 1,0 m, a frequência de passagem de material pelos roletes é de 5 Hz. Vale ressaltar que um fator dinâmico de 10% já foi aplicado à sobrecarga de material na análise estática para cobrir esse efeito.

A velocidade de variação da tensão de correia em um transportador de correia depende das propriedades mecânicas da correia, da extensão do transportador de correia, dentre outros parâmetros considerados em seu cálculo mecânico. Como nesse projeto considera-se um transportador de correia de longa distância, a velocidade de variação nas tensões de correia foi considerada desprezível frente às frequências naturais de estruturas de aço. Desta forma, as ações de tensão de correia na estrutura foram tratadas como ações estáticas.

A Tabela 11 resume as fontes de ações dinâmicas conhecidas na estrutura e consideradas neste estudo com suas respectivas frequências.

Tabela 11: Fontes de ações dinâmicas conhecidas na estrutura.

Fonte	Frequência [Hz]
Vento	-
Desbalanceamento do tambor	0,88
Transporte de material sobre os roletes	5,00

Fonte: Elaboração própria.

Os cinco primeiros modos de vibração da estrutura e suas frequências são mostrados na Tabela 12. Destaca-se que o primeiro modo de vibração da estrutura já apresenta frequência aproximadamente 1,5 vezes maior que a maior frequência de excitação estudada para a casa de transferência.

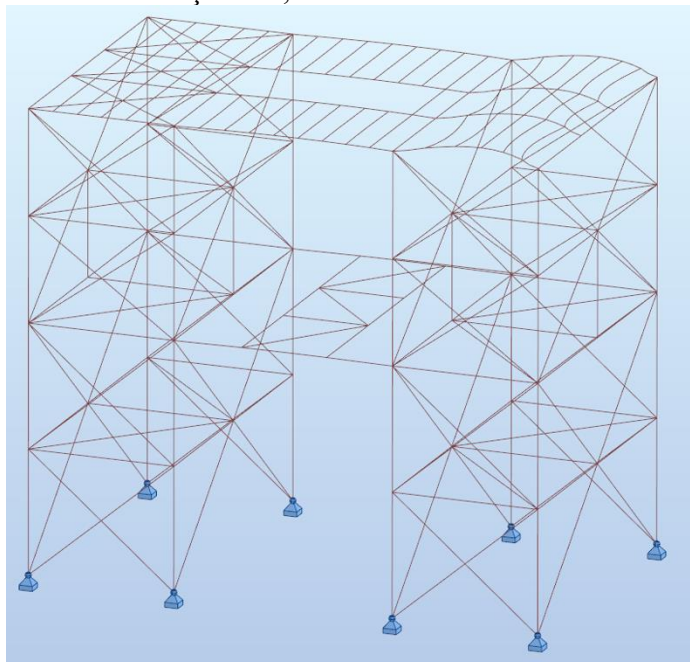
Tabela 12: Primeiros modos e frequências naturais da estrutura.

Modo	Descrição	Frequência [Hz]
1º modo	Translação no plano horizontal das vigas de piso	7,47
2º modo	Translação no plano horizontal das vigas de piso	8,02
3º modo	Translação no plano horizontal das vigas de piso	8,54
4º modo	Translação global da estrutura na direção longitudinal	9,33
5º modo	Translação lateral dos eixos 1 e 2	10,66

Fonte: Elaboração própria.

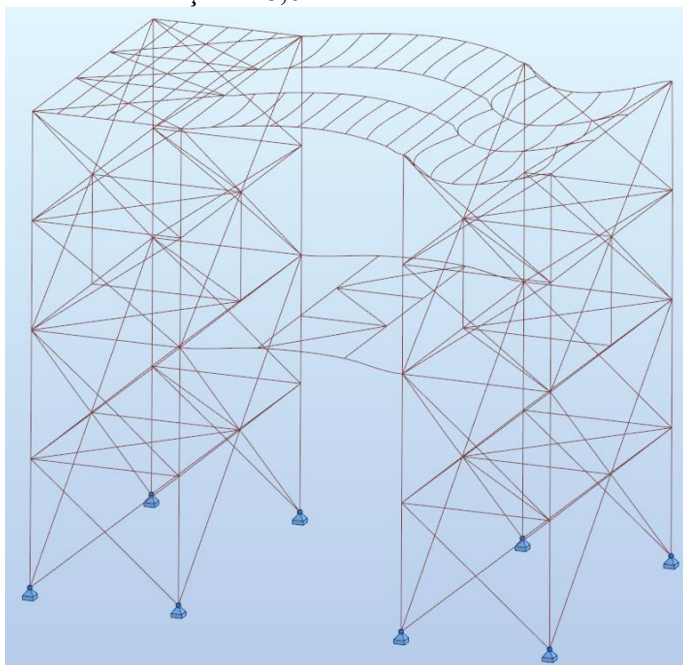
Os três primeiros modos de vibração são mostrados na Figura 15, Figura 16 e Figura 17. Estes modos são descritos como a translação no plano horizontal das vigas de piso da casa de transferência e apresentam deformada na mesma direção que as ações de vento. Entretanto, por terem frequências superiores a 1,00 Hz, não há efeito dinâmico importante para a estrutura.

Figura 15: Primeiro modo de vibração – 7,47 Hz.



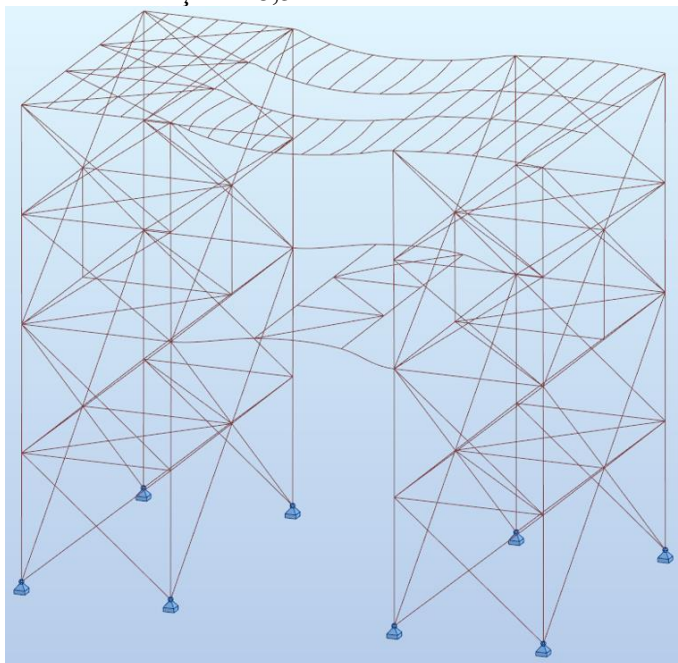
Fonte: Elaboração própria.

Figura 16: Segundo modo de vibração – 8,02 Hz.



Fonte: Elaboração própria.

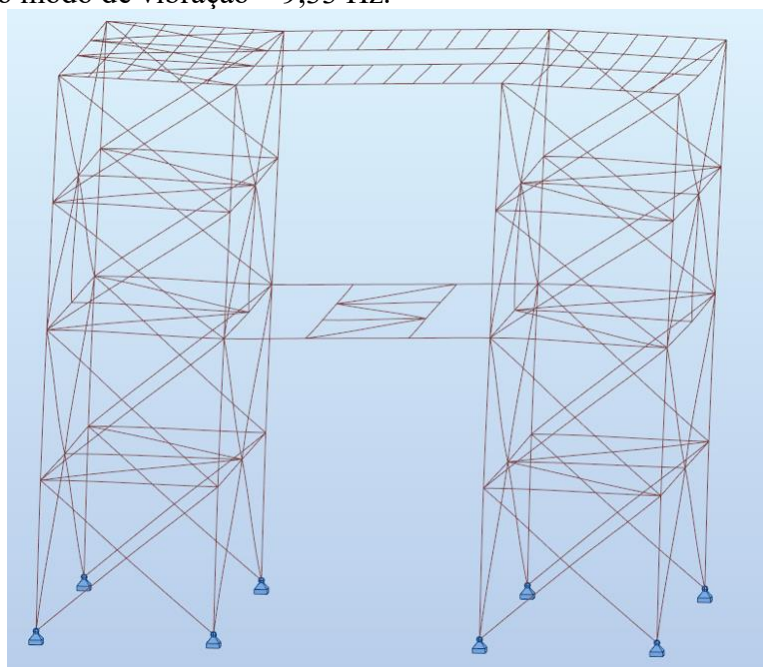
Figura 17: Terceiro modo de vibração – 8,54 Hz.



Fonte: Elaboração própria.

O quarto modo de vibração da estrutura é mostrado na Figura 18. Neste modo, a estrutura apresenta translação global no sentido longitudinal (sentido de transporte de material do TC-01). A direção do modo é coincidente com a excitação causada pelo desbalanceamento do tambor do TC-01. Apesar disso, a frequência natural do modo é mais de dez vezes superior à frequência da rotação do tambor. Por isso, conclui-se que não há efeito dinâmico importante para a estrutura.

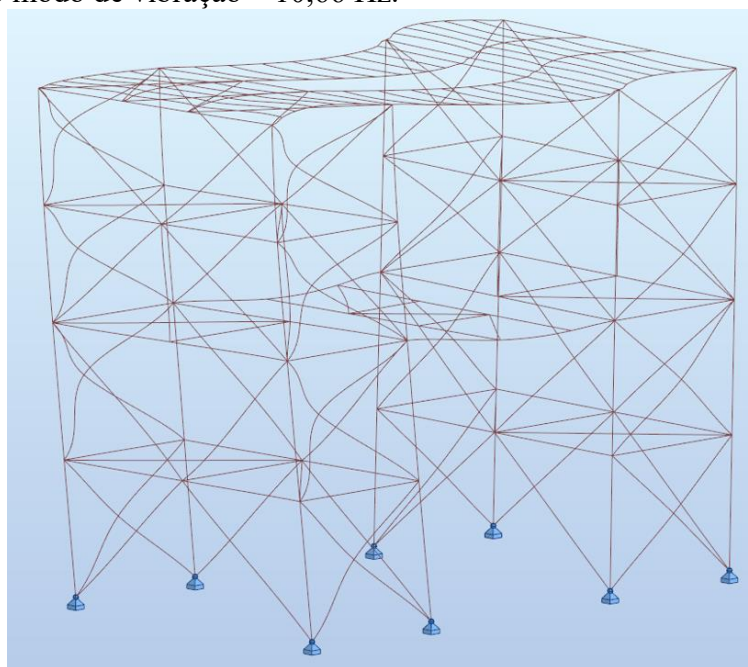
Figura 18: Quarto modo de vibração – 9,33 Hz.



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, o quinto modo de vibração da casa de transferência é apresentado na Figura 19. O modo é caracterizado pela translação dos eixos 1 e 2 da estrutura na direção lateral. A única fonte de efeitos dinâmicos que poderia excitar a estrutura de forma significativa nesse modo é o vento. Entretanto, a frequência natural da estrutura para o quinto modo é muito superior à faixa de risco definida para a ação do vento. Desta forma, considera-se que não há risco de a casa de transferência sofrer efeitos dinâmicos significativos por esse modo de vibração.

Figura 19: Quinto modo de vibração – 10,66 Hz.



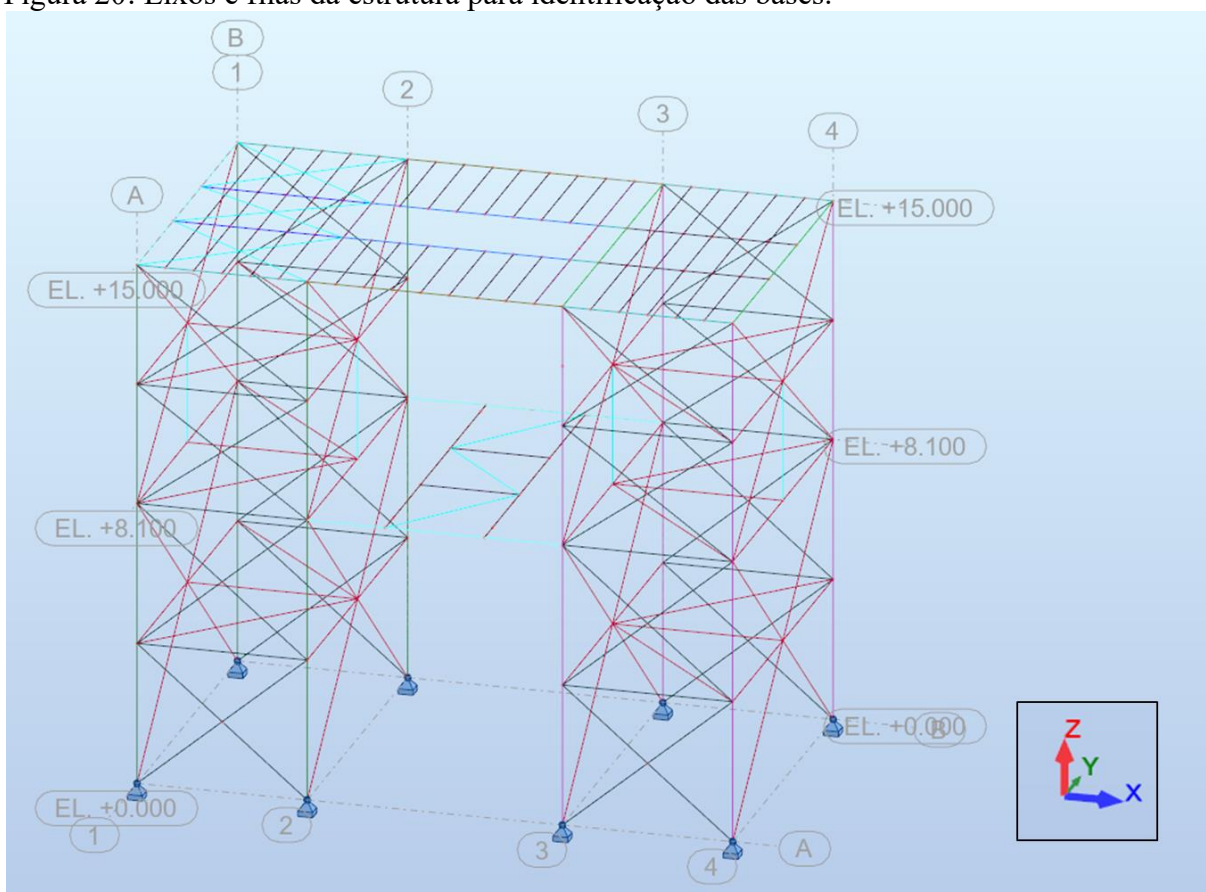
Fonte: Elaboração própria.

4.4.6 Quadro de cargas para fundações

Nesta seção é apresentado um quadro de cargas para as fundações. Destaca-se que, neste projeto, optou-se por bases rotuladas de forma a não sobrecarregar as fundações.

Os eixos e filas da casa de transferência são apresentados na Figura 20 para identificação das bases. O eixo de coordenadas utilizado também é destacado na figura para indicar a direção das ações do quadro de cargas.

Figura 20: Eixos e filas da estrutura para identificação das bases.



Fonte: Elaboração própria.

A seguir, é apresentado o quadro de cargas para fundações da casa de transferência projetada para as ações definidas na Tabela 1.

Figura 21: Quadro de cargas – Bases 1A e 1B.

Base:	1A		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	-13,3	-7,9	-140,5
CPE	-46,8	-11,0	-299,1
SCM1	-14,7	-8,3	-182,1
SCM2	-40,0	-16,1	-379,1
SCP	-19,3	-6,9	-179,4
PC	2,4	13,9	45,9
TC1	-529,7	-146,0	-3855,5
TC2	-641,2	-176,7	-4667,1
VTY	3,9	48,9	105,1
VTX	54,9	5,8	211,8
ET	-159,3	-63,0	-239,7

Base:	1B		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	-13,3	7,9	-140,5
CPE	-46,9	11,1	-299,7
SCM1	-27,5	8,4	-240,9
SCM2	-56,9	16,2	-456,7
SCP	-19,2	7,0	-178,8
PC	-2,4	13,9	-45,9
TC1	-529,9	146,1	-3856,4
TC2	-641,5	176,8	-4668,3
VTY	-3,9	48,9	-105,1
VTX	54,7	-5,9	211,5
ET	-172,6	74,6	-265,3

Fonte: Elaboração própria.

Figura 22: Quadro de cargas – Bases 2A e 2B.

Base:	2A		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	8,3	-9,2	-139,9
CPE	0,9	-19,7	-407,9
SCM1	4,2	-7,8	-107,3
SCM2	-2,1	-12,4	-183,6
SCP	2,7	-7,2	-148,2
PC	-0,9	16,8	27,9
TC1	-519,8	142,1	3767,9
TC2	-629,3	172,0	4561,1
VTY	-5,9	51,3	109,1
VTX	55,7	-5,7	-201,5
ET	-9,3	-60,3	248,2

Base:	2B		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	8,3	9,2	-139,7
CPE	0,9	19,7	-408,8
SCM1	2,3	7,8	-202,6
SCM2	-4,7	12,5	-309,2
SCP	2,8	7,2	-149,4
PC	0,9	16,8	-27,9
TC1	-520,1	-141,7	3768,1
TC2	-629,6	-171,5	4561,3
VTY	5,9	51,3	-109,1
VTX	55,5	5,8	-201,0
ET	-14,9	59,2	256,8

Fonte: Elaboração própria.

Figura 23: Quadro de cargas – Bases 3A e 3B.

Base:	3A		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	-11,6	-11,5	-109,1
CPE	-1,3	-21,5	-224,4
SCM1	-0,9	-13,8	-88,3
SCM2	-9,5	-35,2	-337,4
SCP	-8,2	-14,8	-164,0
PC	2,1	16,1	40,6
TC1	-421,7	-140,3	-2257,5
TC2	-510,5	-169,9	-2732,7
VTY	3,9	42,1	71,3
VTX	46,9	6,9	143,3
ET	25,2	-53,9	249,5

Base:	3B		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	-11,6	11,5	-109,3
CPE	-1,4	21,5	-225,2
SCM1	-3,2	12,5	-178,2
SCM2	-12,7	33,4	-455,8
SCP	-9,0	14,9	-168,0
PC	-2,1	16,1	-40,6
TC1	-421,9	140,0	-2257,5
TC2	-510,7	169,4	-2732,8
VTY	-3,9	42,1	-71,2
VTX	46,7	-6,9	143,1
ET	19,2	41,6	255,6

Fonte: Elaboração própria.

Figura 24: Quadro de cargas – Bases 4A e 4B.

Base:	4A		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	16,5	-9,3	-102,1
CPE	47,3	-10,4	-172,8
SCM1	10,8	-1,7	-17,1
SCM2	51,1	-11,1	-161,8
SCP	24,9	-6,8	-107,6
PC	-4,3	14,7	33,2
TC1	-428,4	146,0	2345,0
TC2	-518,5	176,7	2838,7
VTY	-7,2	37,5	72,4
VTX	46,6	-7,4	-153,6
ET	155,7	-68,0	-258,0

Base:	4B		
Ação	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]
CP	16,6	9,3	-102,2
CPE	47,4	10,4	-173,3
SCM1	28,8	2,9	-81,0
SCM2	74,8	12,7	-245,9
SCP	25,3	6,6	-113,0
PC	4,3	14,7	-33,2
TC1	-428,6	-146,1	2345,9
TC2	-518,8	-176,9	2839,7
VTY	7,3	37,5	-72,4
VTX	46,5	7,4	-153,5
ET	156,0	69,7	-247,0

Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, um projeto de casa de transferência para transportadores de correia em estrutura de aço foi desenvolvido. Por meio desse projeto, alguns dos aspectos relevantes a serem considerados no projeto estrutural de casas de transferência foram abordados, como a determinação de ações, verificações da estrutura e critérios de projeto.

Para a determinação das ações devidas ao transporte de material, o método proposto pela CEMA (2014) foi utilizado. Com isso, tanto ações operacionais quanto ações acidentais de material foram definidas. Além disso, a ação de tensões na correia, característica de transportadores de correia, também foi considerada no projeto.

Para o lançamento da estrutura, a estabilização por meio de contraventamentos foi selecionada por ser uma opção geralmente mais econômica. Além disso, essa solução normalmente é mais eficiente para resistir a ações horizontais de grande magnitude, como é o caso das tensões de correia propostas no projeto. A estrutura final apresenta massa total de, aproximadamente, 100,3 toneladas.

Quanto às verificações estruturais, a resistência dos perfis selecionados foi verificada conforme a ABNT NBR 8800:2008, assim como os deslocamentos admissíveis da estrutura. Em seguida, a estrutura foi avaliada em uma análise modal para determinar seus principais modos de vibração e suas frequências foram comparadas às frequências das fontes de excitação existentes na estrutura. Uma análise dinâmica foi descartada a partir dessas comparações.

Por fim, um quadro de cargas foi fornecido para projeto das fundações. No projeto, foram selecionadas bases rotuladas, que tendem a não sobrecarregar as fundações e torná-las mais econômicas.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS. **TECHNICAL REPORT NO. 13:** Guide for the Design and Construction of Mill Buildings. Pittsburgh, Pennsylvania, EUA: AISE, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884:** Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

CEMA. *Belt conveyors for bulk materials*. 7. ed. Orlando: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2014.

CORREIAS MERCÚRIO SA INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Entenda o que quer dizer TCLD, suas funcionalidades e custos.** Disponível em: <https://www.correiasmercurio.com.br/o-que-quer-dizer-tclid/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis Castro e; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.** São Paulo: Pearson, 2017.

LINCE INSTRUMENTOS E RADIOPROTEÇÃO. **Chute de descarga.** Disponível em: <https://lincebrasil.com/aplicacao/chute-de-descarga/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

TENAX ENGENHARIA E GERENCIAMENTO. **Vale - S11D.** Disponível em: <https://tenax-eng.com.br/segmentos/mineracao/vale-s11d-2/>. Acesso em: 10 jan. 2025.