



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Outros temas - Estudo de Caso - Silo Estrutural em Prédio Industrial para Mineração

**SILO ESTRUTURAL: SOLUÇÃO DE ENGENHARIA PARA VIABILIZAÇÃO DO PROJETO CAPANEMA
UMIDADE NATURAL - VALE®**

Amaury Eloy Carvalho Araújo Sales ¹

Luciana Barros Chaves de Paula ²

Laís Cristina Benevides Pereira ³

Resumo

Esse artigo aborda a solução de engenharia da AtkinsRéalis adotada em dois prédios de processo em planta de mineração, com o objetivo de viabilizar o projeto. Por se tratar de um empreendimento do tipo “brownfield” com área de proteção ambiental no entorno, havia uma limitação de área de terreno para uma fase do beneficiamento do minério que implicou dimensões limitantes para as edificações. A solução técnica adotada consistiu na incorporação da estrutura do silo à estrutura dos prédios de Peneiramento e Britagem Terciária, permitindo que ambos funcionassem de forma integrada. Atualmente, essas edificações encontram-se em fase de operação.

Palavras-chave: Silo, Mineração, Estrutura Metálica

**STRUCTURAL SILO: ENGINEERING SOLUTION FOR THE FEASIBILITY OF THE CAPANEMA NATURAL
HUMIDITY PROJECT - VALE®**

Abstract

This paper discusses the engineering solution adopted in two process buildings at a mining plant, aiming to make the implementation of the project. As a brownfield project with a surrounding environmental protection area, there was a land area limitation for one phase of ore processing, which resulted in restricted building dimensions. The technical solution was to incorporate the silo structure into the tertiary Screening and Crushing Buildings, which now operate as an integrated system. Currently, these buildings are in the operational phase.

Keywords: Silo, Mining, Steel Structure

¹ Engenheiro Civil e Mestre em Construções Metálicas pela UFOP, Responsável de Disciplina Estrutura Metálica da AtkinsRéalis, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheira Civil e Mestre em Engenharia de Estruturas pela UFMG, Engenheira Calculista da Disciplina Estruturas Metálicas da AtkinsRéalis, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheira Civil graduada pela UFMG, Engenheira Calculista da Disciplina Estruturas Metálicas da AtkinsRéalis, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

1 INTRODUÇÃO

A disciplina Estruturas Metálicas da AtkinsRéalis possui vasta experiência em projetos desafiadores no setor de mineração. Na Mina de Capanema da Vale, por exemplo, nossa equipe foi fundamental para viabilizar a última fase do beneficiamento do minério em uma área com restrições ambientais e de espaço.

A proteção ambiental exigiu que a área utilizada pela planta não ultrapassasse os limites já ocupados na atividade de 20 anos atrás. Assim, antes da chegada ao Pátio de Homogeneização, a única área livre disponível para aquela fase do novo projeto era muito restrita. Especialmente nesta região, o layout precisou ser adaptado a condições extremamente limitantes quanto ao espaço.

A solução técnica adotada, embora mais complexa, permitiu a redução das dimensões das edificações por meio da incorporação dos silos da Britagem Terciária e do Peneiramento Terciário à estrutura dos respectivos prédios.

Em plantas de beneficiamento, a configuração convencional é o silo se apoiar sobre vigas do prédio que, por sua vez, é uma estrutura independente. No silo estrutural, os reforços do silo e o seu costado são soldados às colunas de tal modo que silo e prédio trabalham em conjunto, como um sistema único, reduzindo a largura dos prédios.



Figura 1- Modelo 3D do Prédio do Peneiramento Terciário

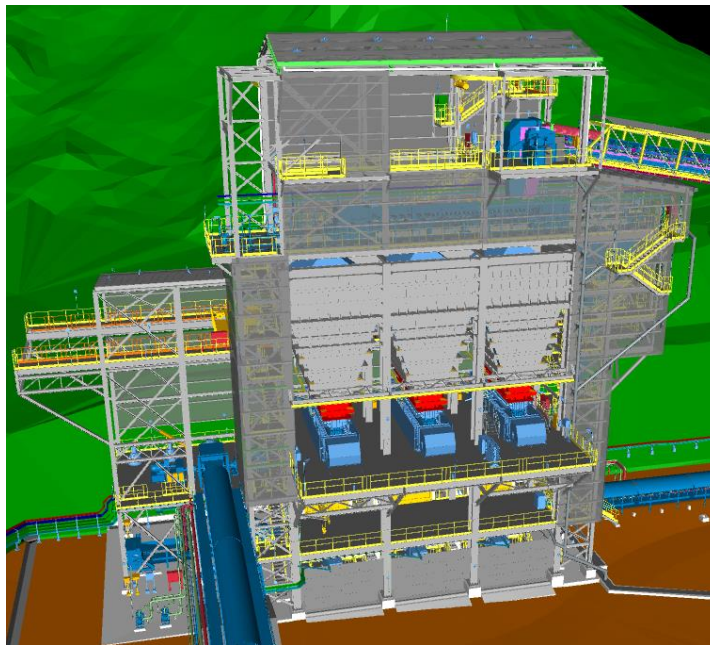


Figura 2- Modelo 3D do Prédio da Britagem Terciária

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os prédios do Peneiramento e Britagem do circuito terciário foram dimensionados com os silos metálicos incorporados à estrutura convencional, contribuindo para o comportamento global e a estabilidade das edificações. Essa configuração exigiu a elaboração de um modelo estrutural conjunto, contemplando silo e prédio:

- A estrutura metálica do prédio foi modelada e dimensionada por elementos de barra;
- A estrutura do silo metálico foi modelada com elementos de área Shell-Thick aplicados às chapas do costado e aos enrijecedores horizontais e verticais.

Para a análise estrutural integrada, as colunas do prédio que suportam os silos foram modeladas em elementos de área ao longo de todo o trecho em contato com a estrutura dos silos, estendendo-se por mais três metros abaixo do ponto de apoio. Essa extensão teve como objetivo permitir a transição adequada entre elementos de área e de barra em uma região isenta de carregamentos concentrados, garantindo melhor resposta na transmissão de esforços, comportamento global do modelo e análise das estruturas.

As cargas atuantes nos silos -peso próprio, sobrecarga do material armazenado, vento e temperatura - foram aplicadas diretamente nos elementos de área. Já as cargas associadas aos prédios -peso próprio, sobrecargas, equipamentos, vento, temperatura - foram aplicadas nos elementos de barra. Com isso, a estrutura passou a atuar de forma integrada, com os silos sendo suportados pelas colunas dos prédios e,

simultaneamente, contribuindo para a estabilidade global como elementos rígidos, conectados às colunas por meio dos enrijecedores horizontais (perfis do tipo I, T e seção caixa) ao longo do trecho reto.

Para a análise da estabilidade global e o dimensionamento das barras estruturais dos prédios, utilizou-se o modelo integrado silo-prédio.

Já para o dimensionamento detalhado dos silos, foi necessária uma discretização mais refinada dos elementos de área, realizada em um modelo separado, posteriormente compatibilizado com o modelo estrutural completo.

2.1 Silo do Peneiramento Terciário

O Peneiramento Terciário é composto por um edifício em estrutura metálica, com dimensões de 33,9 metros de largura, 48 metros de comprimento e 57 metros de altura. O silo associado possui seis tremonhas, com largura interna de 8,1 metros e comprimento interno total de 47,3 metros. A altura da parede vertical é de 4,1 metros, enquanto a altura das tremonhas é de 9,8 metros.

As figuras 3 e 4 ilustram o modelo estrutural de análise conjunto, silo integrado ao prédio, e a figura 5 indica as dimensões da seção transversal do silo estrutural.

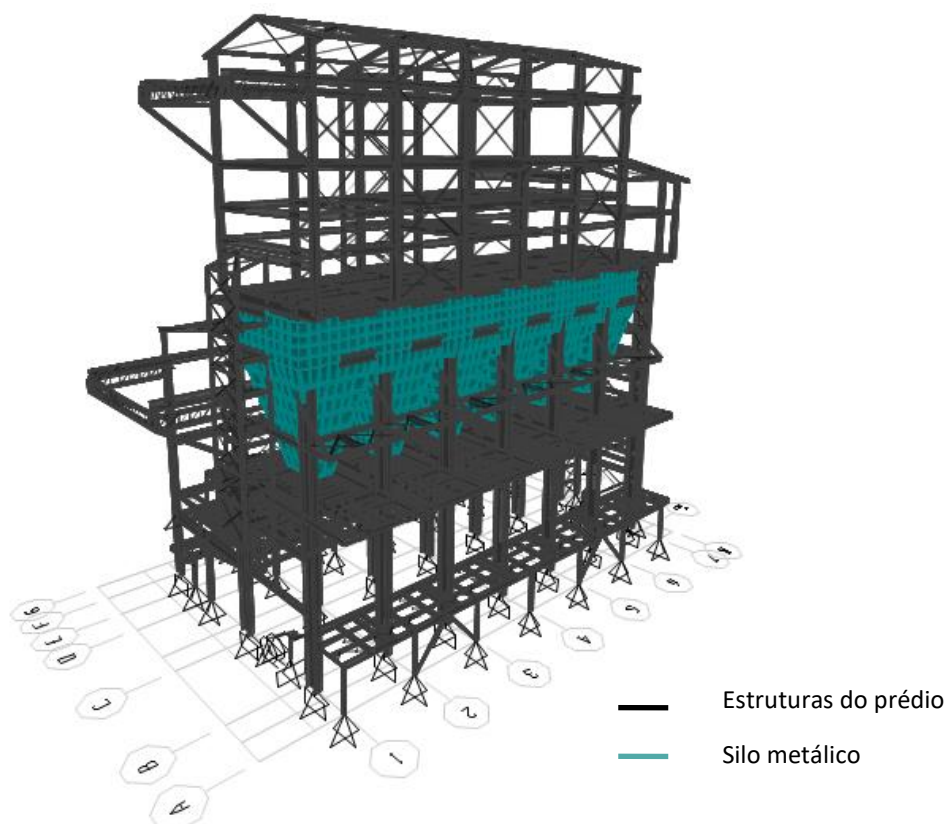


Figura 3- Perspectiva 1 do Modelo Estrutural do Prédio do Peneiramento Terciário

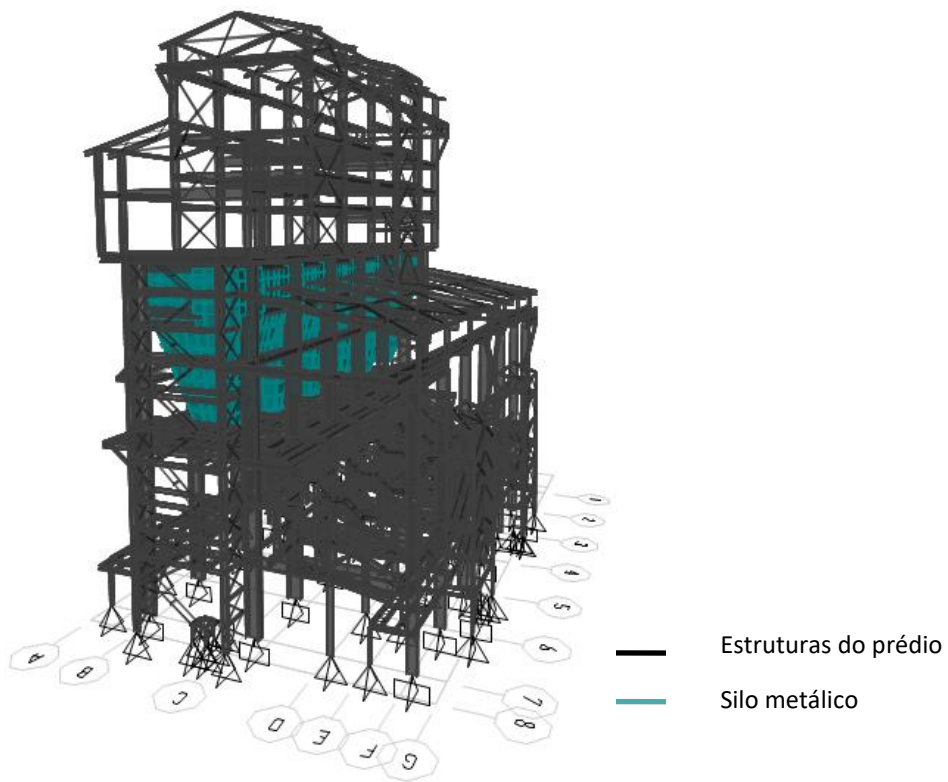


Figura 4 - Perspectiva 2 do Modelo Estrutural do Prédio do Peneiramento Terciário

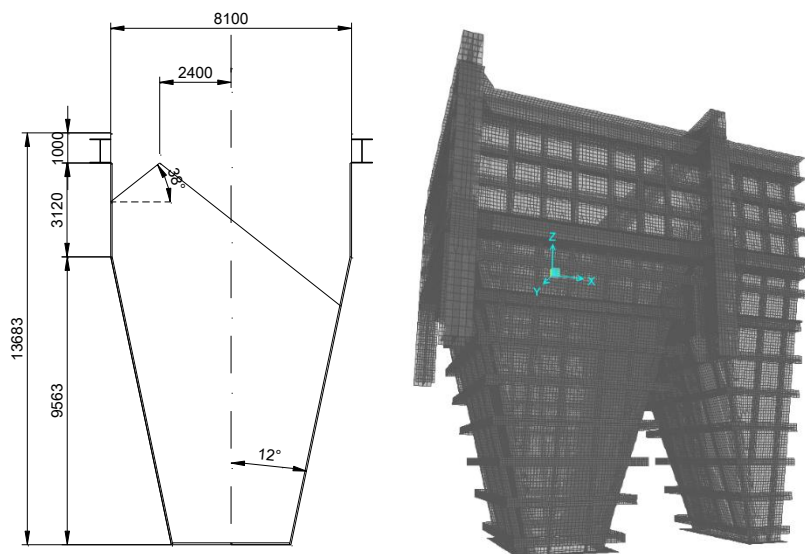


Figura 5- Silo do Prédio do Peneiramento Terciário (medidas em mm)

Para viabilizar uma discretização refinada no modelo de análise do silo estrutural, foram modeladas integralmente a primeira tremonha e metade da segunda. A extremidade do modelo recebeu condições de contorno representativas de um plano de simetria.

O silo do Peneiramento Terciário é constituído por um costado formado por chapas metálicas com espessuras variando entre 16 mm e 25 mm, enrijecidas por nervuras horizontais e verticais com seções transversais em T ou em caixa. O apoio do silo ocorre através dos enrijecedores horizontais da parte reta do equipamento conectados às colunas da estrutura, sendo o principal elemento de sustentação um anel com seção em caixa, rigidamente soldado às colunas do edifício.

O carregamento do silo é efetuado por dois transportadores móveis, conforme ilustrado na Figura 6.

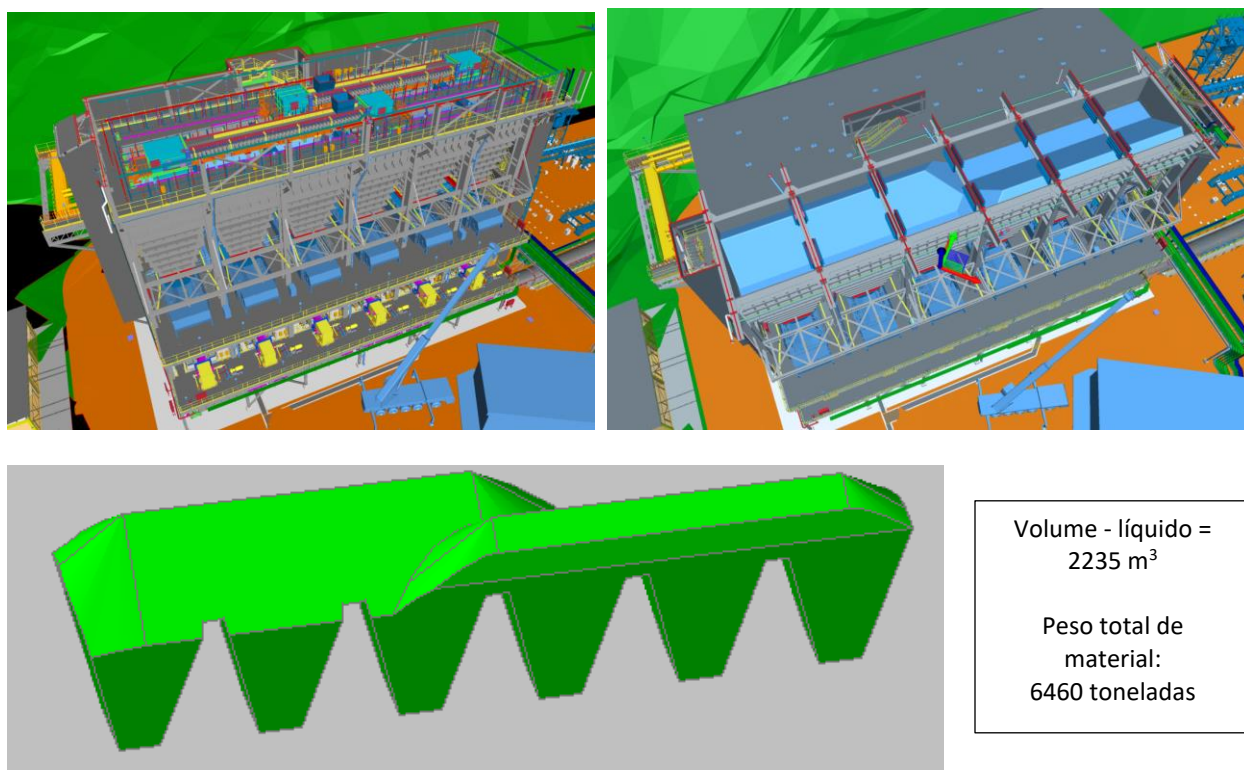


Figura 6- Modelo 3D - Cortes da estrutura do Peneiramento Terciário com foco nos transportadores móveis e material no silo

As cargas provenientes do material e das pressões atuantes no costado do silo foram determinadas conforme os critérios estabelecidos na norma DIN EN 1991-4:2010. As Figuras 7 e 8 apresentam a distribuição das pressões aplicadas ao costado do silo nas condições de enchimento e esvaziamento do material. Observa-se, a partir dessas figuras, que as maiores pressões se concentram na região inicial da tremonha, imediatamente após a parte reta do silo.

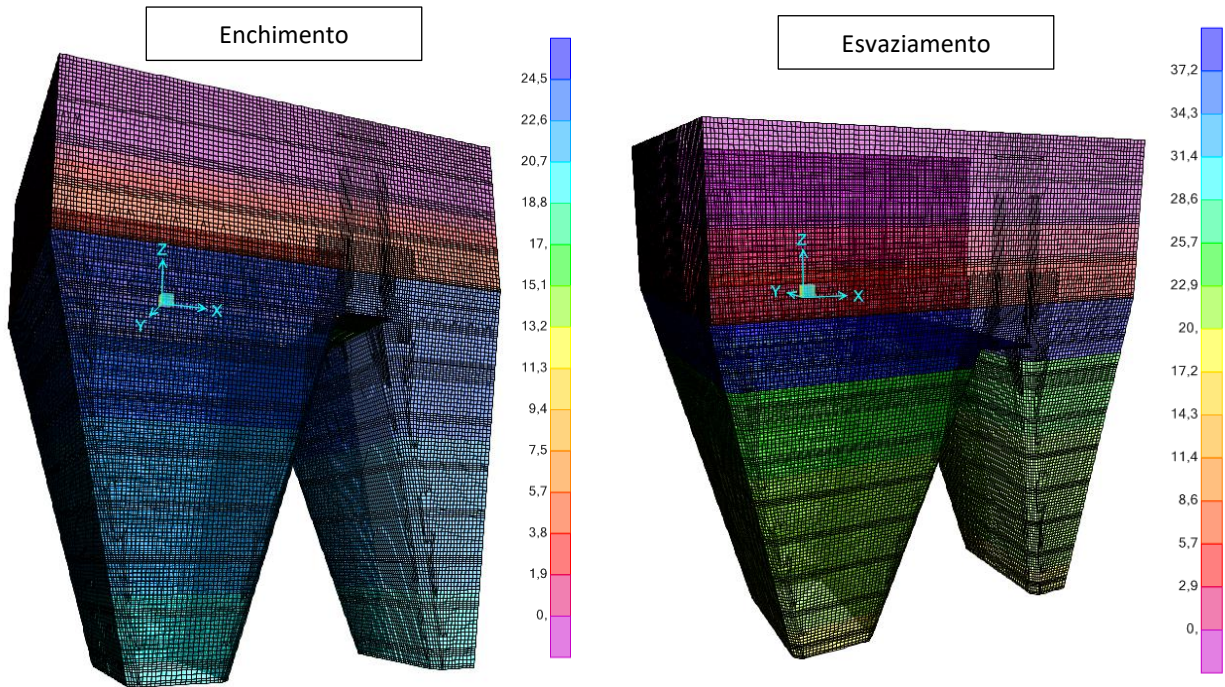


Figura 7- Peneiramento Terciário – Enchimento e Esvaziamento – pressão normal ao costado (tf/m²)

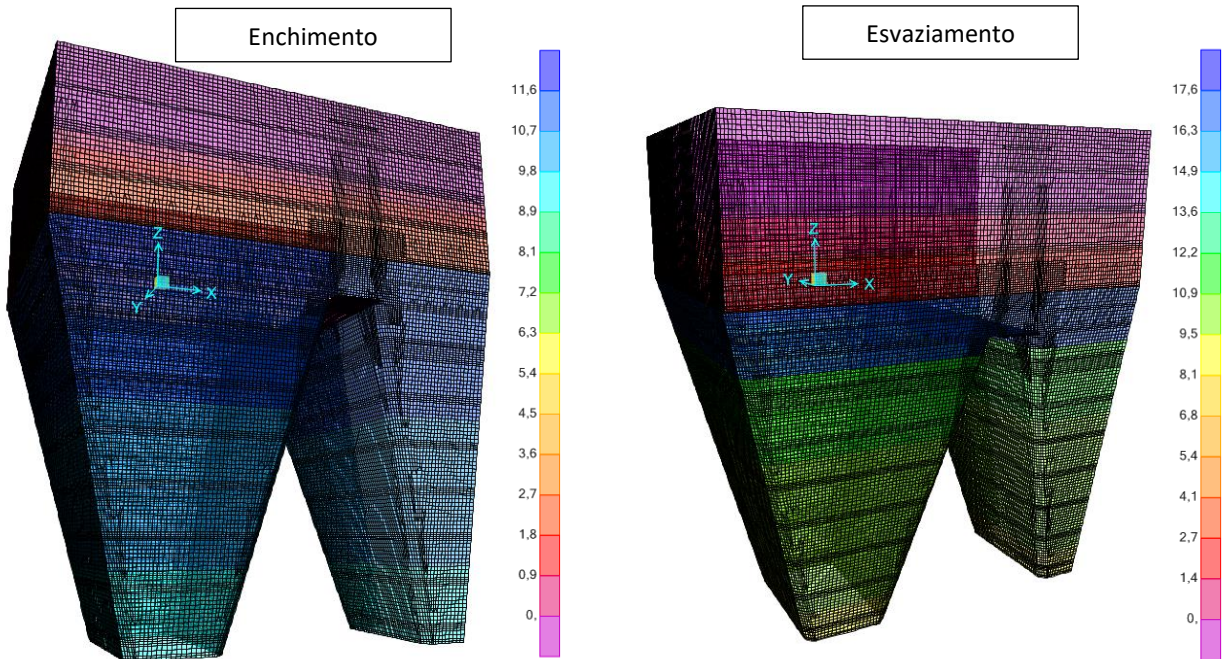


Figura 8- Peneiramento Terciário – Enchimento e Esvaziamento – pressão paralela (atrito) ao costado (tf/m²)

2.2 Silos da Britagem Terciária

A Britagem Terciária é composta por um edifício em estrutura metálica, com 16 metros de largura, 44,2 metros de comprimento e 43 metros de altura. O silo associado possui três tremonhas, com largura interna de 5,4 metros e comprimento interno total de 21,6 metros. A altura da parede vertical é de 4,0 metros, enquanto a altura das tremonhas é de 8,1 metros.

As figuras 9 e 10 ilustram o modelo estrutural de análise conjunto, silo integrado ao prédio, e a figura 11 indica as dimensões da seção transversal do silo estrutural.

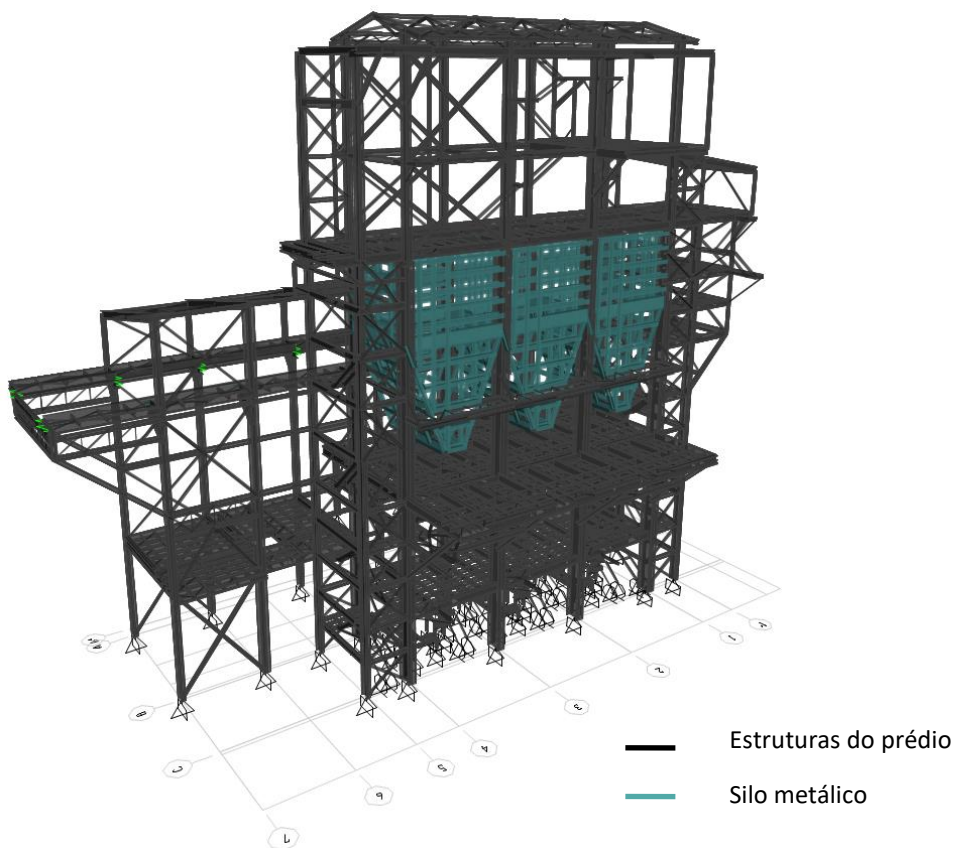


Figura 9- Perspectiva 1 do Modelo Estrutural do Prédio da Britagem Terciária

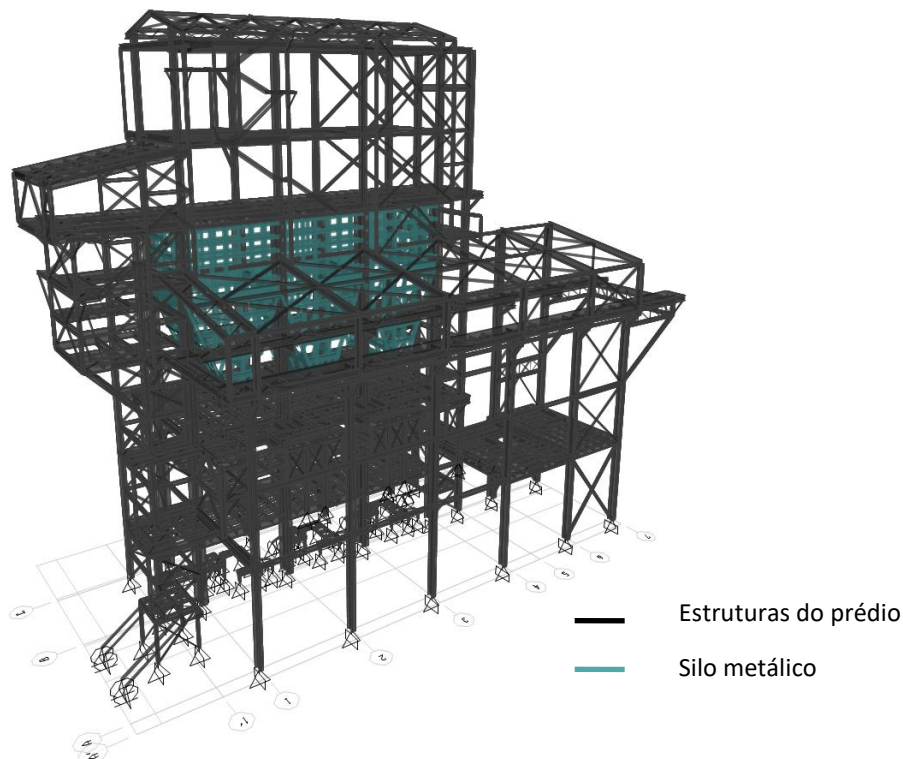


Figura 10 - Perspectiva 2 do Modelo Estrutural do Prédio da Britagem Terciária

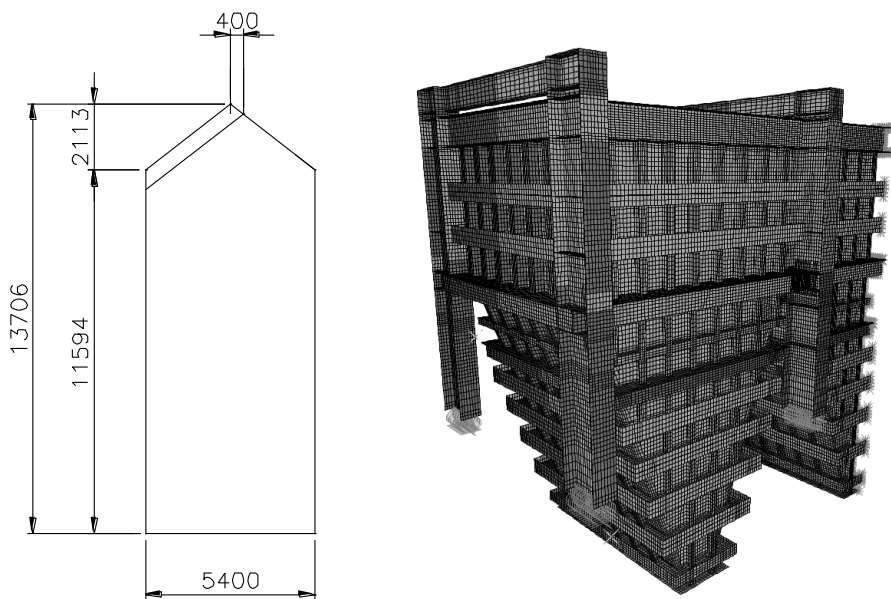


Figura 11- Silo do Prédio da Britagem Terciária (medidas em mm)

Assim como no edifício do Peneiramento Terciário, foi desenvolvido um modelo específico de análise para o silo estrutural, com o objetivo de viabilizar uma discretização refinada.

O silo é constituído por um costado formado por chapas metálicas com espessuras variando entre 16 mm e 25 mm, enrijecidas por nervuras horizontais e verticais com seções em T, cantoneira ou em caixa. O apoio do silo ocorre através dos enrijecedores horizontais da parte reta do equipamento conectados às colunas da estrutura, sendo o principal elemento de sustentação um anel com seção em caixa, rigidamente soldado às colunas do edifício.

O carregamento do silo é realizado por um transportador móvel, conforme ilustrado na Figura 12.

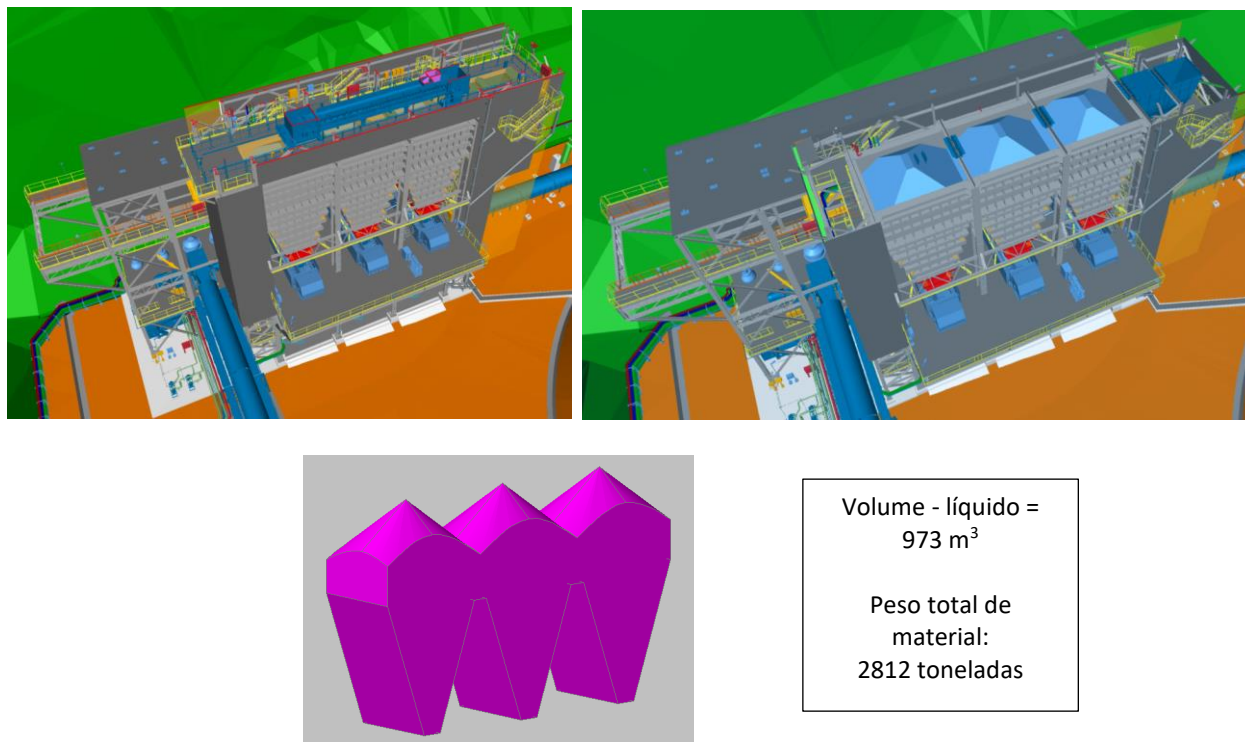


Figura 12- Modelo 3D - Cortes da estrutura da Britagem Terciária com foco no transportador móvel e material no silo

As tremonhas do silo da Britagem Terciária apresentam faces longitudinais verticais, alinhadas com o costado superior, o qual é rigidamente conectado às colunas da estrutura.

A metodologia adotada para o cálculo das cargas e o dimensionamento do silo da Britagem Terciária seguiu os mesmos critérios aplicados ao silo do Peneiramento Terciário. As Figuras 13 e 14 apresentam a distribuição das pressões aplicadas no costado do silo para as hipóteses de enchimento e esvaziamento do material.

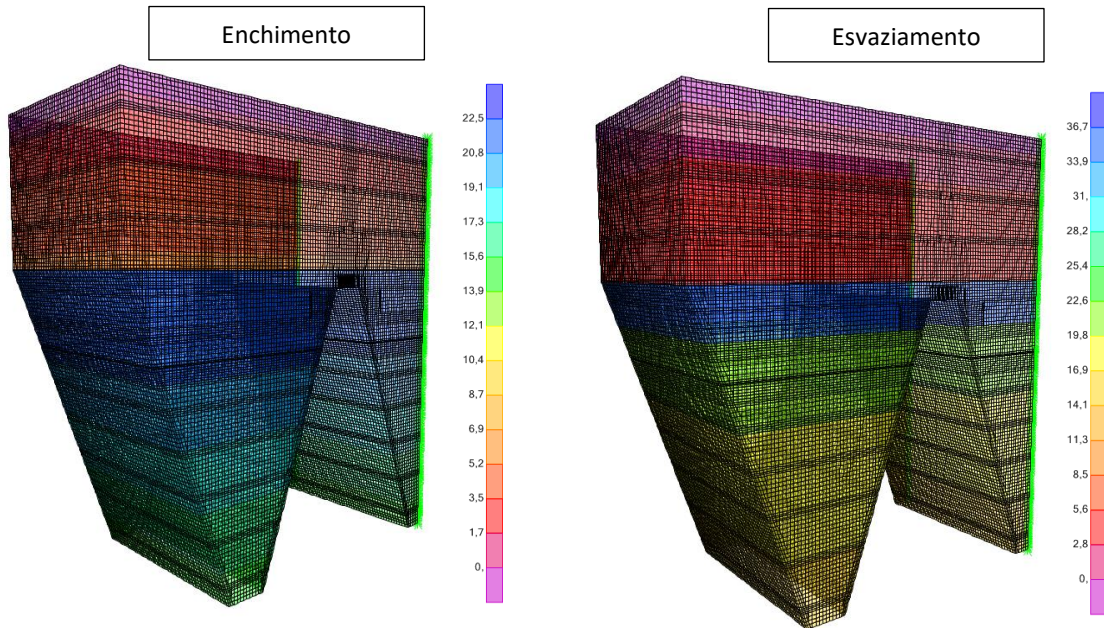


Figura 13- Britagem Terciária – Enchimento e Esvaziamento – pressão normal ao costado (tf/m²)

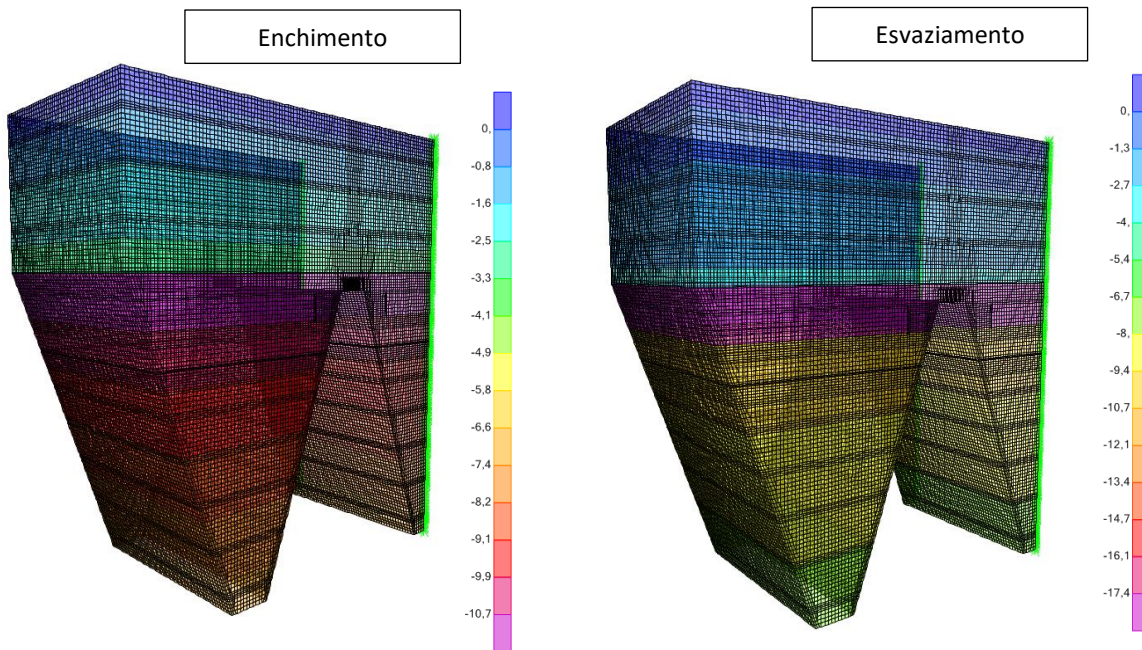


Figura 14- Britagem Terciária – Enchimento e Esvaziamento – pressão paralela (atrito) ao costado (tf/m²)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A solução adotada nos prédios de Peneiramento e Britagem do circuito terciário consistiu na incorporação da estrutura do silo à estrutura do edifício. Para isso, as vigas transversais de reforço do silo, bem como seu costado, foram rigidamente soldados às colunas da edificação, permitindo que ambos os sistemas estruturais atuem de forma integrada.

As figuras a seguir apresentam os resultados de tensões na estrutura do silo sob a condição de esvaziamento — cenário que impõe os maiores esforços e, portanto, é determinante para o dimensionamento estrutural. As Figuras 15 a 17 referem-se ao caso do Peneiramento Terciário, enquanto as Figuras 18 a 20 mostram os resultados correspondentes para o silo da Britagem Terciária.

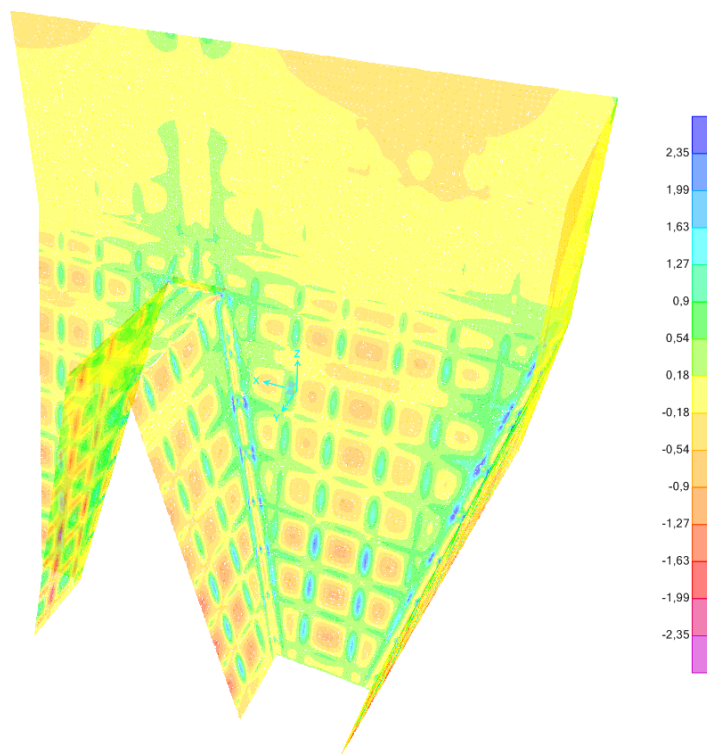


Figura 15- Peneiramento Terciário – Esvaziamento – Tensões de Tração e Compressão do Costado do Silo (tf/m²)

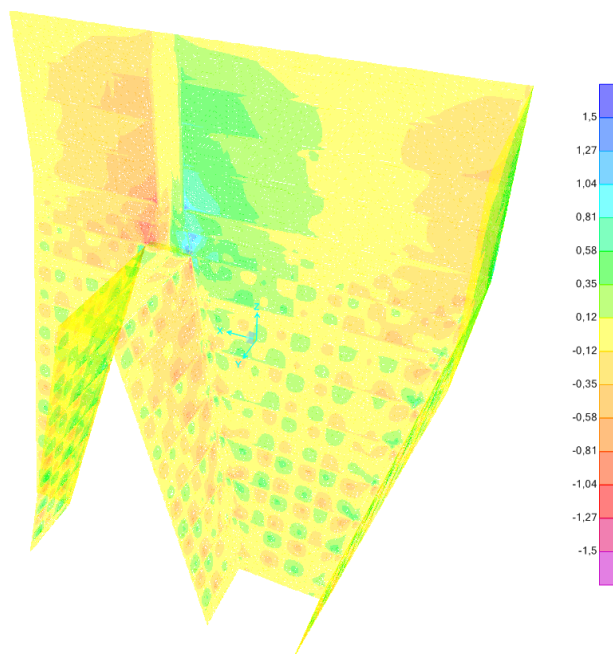


Figura 16 - Peneiramento Terciário – Esvaziamento – Tensão de Cisalhamento do Costado do Silo (tf/m²)

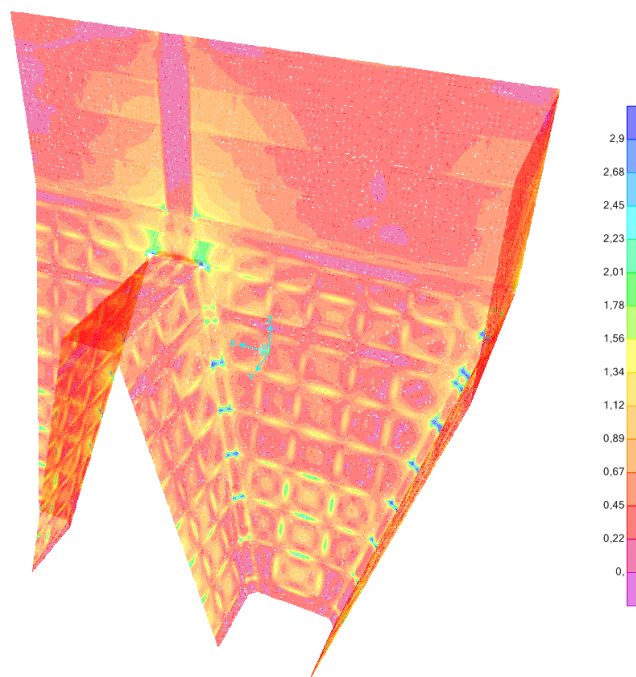


Figura 17- Peneiramento Terciário – Esvaziamento – Tensão de von Mises do Costado do Silo (tf/m²)

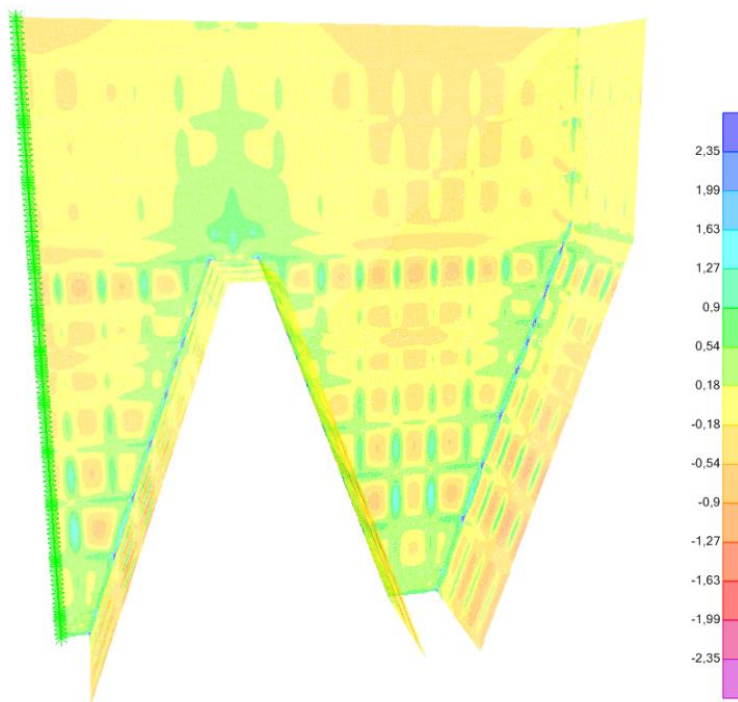


Figura 18- Britagem Terciária – Esvaziamento – Tensões de Tração e Compressão do Costado do Silo (tf/m²)

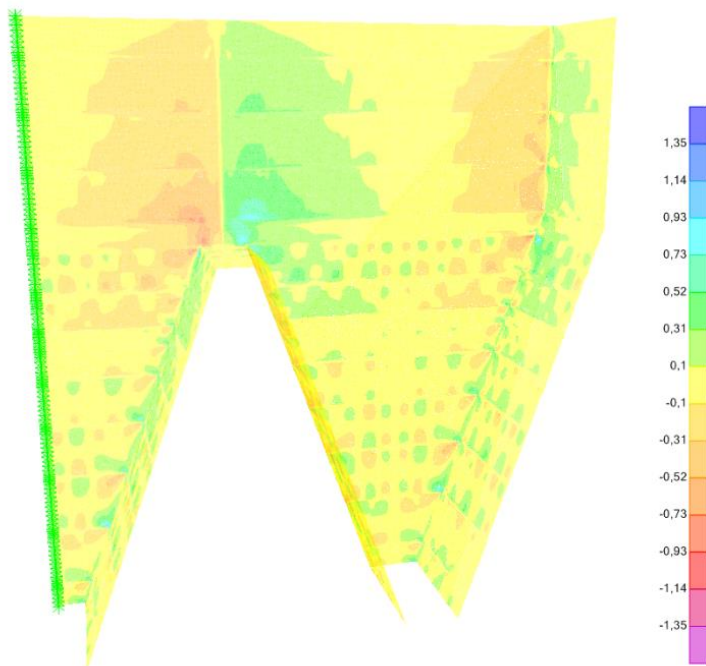


Figura 19- Britagem Terciária – Esvaziamento – Tensão de Cisalhamento do Costado do Silo (tf/m²)

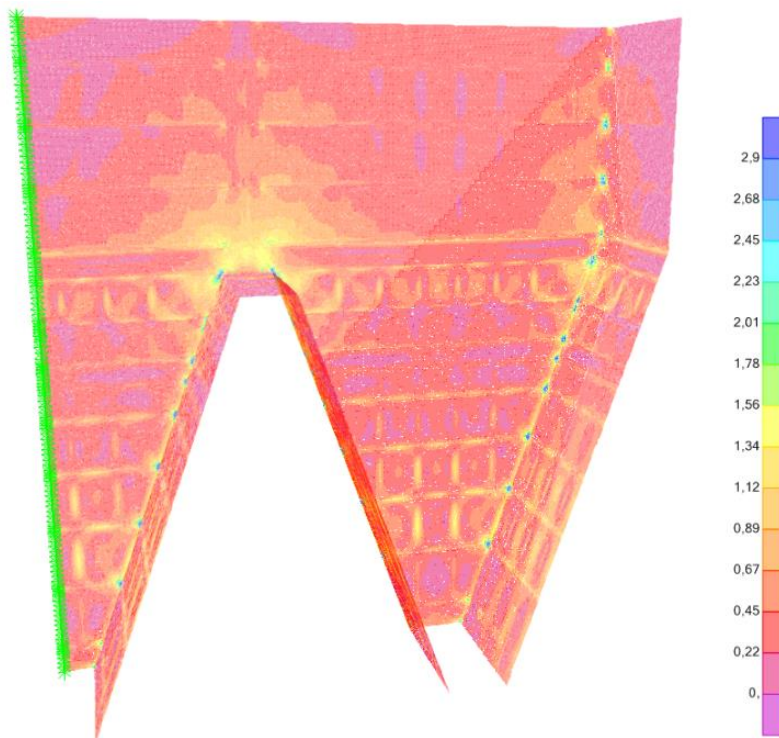


Figura 20- Britagem Terciária – Esvaziamento – Tensão de von Mises do Costado do Silo (tf/m²)

Uma das principais vantagens da solução adotada nos edifícios de Peneiramento e Britagem do circuito terciário é a redução das dimensões do prédio de processo, o que contribui significativamente para a otimização e, em alguns casos, até mesmo a viabilização do layout das plantas de mineração. Outro benefício relevante é a contribuição efetiva do silo metálico para a estabilidade e integridade estrutural do edifício, uma vez que, nessa configuração, o equipamento passa a integrar a estrutura do prédio.

Por outro lado, a união dos elementos estruturais torna o dimensionamento do silo e do prédio interdependente, resultando em um modelo numérico altamente complexo, composto por numerosos elementos de barra e elementos planos. Para viabilizar as análises no software, adotou-se uma malha mais grosseira no modelo conjunto e uma malha refinada no modelo isolado do silo.

Essa solução também aumentou a complexidade do detalhamento das ligações nos desenhos de projeto, sendo necessários muitos chanfros e soldas de penetração. Como consequência, as etapas de fabricação e montagem tornaram-se mais trabalhosas.

Foi necessário um planejamento cuidadoso para garantir a estabilidade da estrutura na fase de montagem do silo. Além disso, a execução de um volume significativo de soldas em campo demandou atenção especial quanto ao acesso e à logística de montagem, em função das particularidades dessa solução estrutural.

Por fim, também houve o desafio da gestão de suprimentos. Como os fornecedores da estrutura metálica e da caldeiraria geralmente são distintos, foi necessário coordenar as atividades entre as fábricas e planejar cuidadosamente o cronograma de entrega dos componentes em campo, de modo a evitar riscos à integridade da estrutura durante a montagem.



Figura 21- Montagem do Prédio do Peneiramento Terciário



Figura 22- Montagem do Prédio da Britagem Terciária

4 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo apresentar a solução estrutural adotada para viabilizar o projeto em uma área de mineração caracterizada por desafios significativos de engenharia. Devido às restrições dimensionais impostas aos edifícios, foi necessário incorporar o equipamento silo à estrutura metálica do prédio.

A adoção dessa solução resultou em um modelo de cálculo estrutural mais complexo, exigindo um volume expressivo de soldas, maior integração entre os fornecedores da estrutura do edifício e do silo, além de uma logística mais elaborada para as etapas de fabricação e montagem.

Apesar da complexidade envolvida, a utilização do silo estrutural mostrou-se fundamental para a viabilização do projeto, proporcionando uma redução de área da ordem de 20%. Essa economia permitiu a otimização do layout da planta e melhorias no fluxo de materiais.

O sucesso do projeto evidencia que a adoção do silo estrutural foi uma solução técnica acertada e eficiente, plenamente alinhada às demandas da engenharia contemporânea. Trata-se de um empreendimento marcado por desafios significativos, prazos restritos e decisões de engenharia bem fundamentadas, que permitiram alcançar os objetivos propostos com excelência.

Agradecimentos

Agradecemos à Dra. Amélia Jacqueline Cunze Oliveira Lanna, Engenheira Civil graduada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com mestrado e doutorado pela Ruhr-Universität Bochum, Alemanha, pela valiosa contribuição técnica prestada ao longo de todo o desenvolvimento deste projeto. Sua atuação como consultora junto à equipe da AtkinsRéalis foi fundamental para a qualidade e o rigor técnico alcançados.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION 15th Edition. AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings, July 2016
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, setembro 2008.
- 3 EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Eurocode 1: Actions on structures, Part 4: Silos and tanks, DIN EN 1991-4, December 2010.