

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE PÓRTICO PARA IÇAMENTO DE FORNALHA

por

Gustavo Araújo da Silva Correa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Correa, Gustavo Araújo da Silva
OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE PÓRTICO PARA IÇAMENTO DE
FORNALHA / Gustavo Araújo da Silva Correa. -- 2022.
28 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. otimização estrutural. 2. método de elementos
finitos. 3. redução de massa. 4. estruturas metálicas.
I. Stumpf, Felipe Tempel, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gustavo Araújo da Silva Correa

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DE PÓRTICO PARA IÇAMENTO DE FORNALHA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, abril de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo apoio em minha educação que recebi, desde as séries iniciais e até a conclusão de minha graduação, à minha mãe, Ana Izabel, ao meu pai Adriano e ao meu irmão, Vítor.

À minha namorada, Giuliana, que esteve presente me apoiando em boa parte de minha graduação.

Aos amigos e colegas de curso que me acompanharam e me fortaleceram em minha trajetória.

Aos professores do departamento de Engenharia Mecânica, em especial aos envolvidos no Laboratório de Combustão (LC) e no Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp), laboratórios que me trouxeram um enorme aprendizado durante atividades de iniciação científica que desenvolvi.

Correa, Gustavo. **Otimização Paramétrica de Pórtico para Içamento de Fornalha**. 2022. 28 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Este trabalho visa à análise detalhada de um projeto cujo intuito é reduzir a massa de uma estrutura metálica que possui a função de içar uma fornalha até seu local de instalação, mantendo sua tensão máxima de von Mises abaixo da tensão máxima atingida no modelo original em sua atividade de erguer a montagem de material refratário. A partir da criação de um modelo numérico da estrutura e da especificação das cargas atuantes em sua situação extrema, é adotado um método de otimização para a realização do redimensionamento do pórtico, que resultam em uma geometria que atende aos requisitos de projeto definidos pelo engenheiro responsável pelo dimensionamento inicial. Após o processo de otimização, é então realizada uma análise local na região crítica da estrutura com o fim de redimensionar a união soldada para trazer maior segurança ao pórtico.

PALAVRAS-CHAVE: otimização estrutural, método de elementos finitos, redução de massa, estrutura metálica, pórtico.

Correa, Gustavo Araújo da Silva. **Parametric Optimization of Portico for Furnace Lifting**. 2022. 28 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This project has the aim of reducing the mass of a metallic structure that has the function of lifting one of its rice husk furnaces to its installation location, keeping its maximum von Mises stress below the maximum stress achieved in the original model throughout its activity. Parting from the creation of a numerical model of the structure and the specification of the loads acting in a extreme situation, an optimization method is adopted to carry out the resizing of the frame, which results in a geometry that meets the design requirements, defined by the responsible engineer for the original design. After the optimization process, a local analysis is carried out in the critical region of the structure in order to resize the welded joint to maintain security to the frame.

KEYWORDS: structural optimization, finite element method, mass reduction, metallic structure, frame

NOMECLATURA

Símbolos

\mathbf{x}	Vetor de variáveis de projeto
\mathbf{x}^*	Vetor de variáveis de projeto avaliado em um ponto
x	Variável de Projeto
S	Espaço viável de solução
$f(x)$	Função objetivo
$\Phi(x)$	Função equivalente para otimização
ε	Parâmetro de convergência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
2.1 Projeto Ótimo e Projeto Convencional.....	2
2.2 Formulação de Projetos de Otimização	3
2.2.1 Descrição do Problema/Projeto	3
2.2.2 Coleta de Dados e Informações	3
2.2.3 Identificação e Definição de Variáveis de Projeto	3
2.2.4 Identificação de um Critério a Ser Otimizado	3
2.2.5 Identificação de Restrições	3
2.3 Mínimo Local e Mínimo Global.....	4
2.4 Otimização Baseada em Gradiente.....	4
2.5 Análise Global e Local com Elementos Finitos	5
3. CASO DE ESTUDO	6
3.1 Geometria, Material e Condições de Contorno	6
3.2 Modelagem	7
3.2.1 Geometria e Condições de Contorno.....	8
3.3 Parâmetros para Otimização.....	10
3.4 Análise Local com Elementos Finitos	10
4. RESULTADOS	11
4.1 Análise da Estrutura Inicial	11
4.1.1 Análise Local da Estrutura Inicial	11
4.2 Processo de Otimização.....	13
4.3 Análise da Estrutura Otimizada.....	13
4.3.1 Análise Local da Estrutura Otimizada.....	14
4.3.2 Ajustes e Reanálise da Estrutura Otimizada.....	14
5. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A – Condições de Contorno.....	17
APÊNDICE B – Tensões de von Mises para o modelo com elementos unidimensionais	18
APÊNDICE C – Modelo Local	19
APÊNDICE D – Comparativos	20

1. INTRODUÇÃO

Com o intuito de tornar seus produtos e processos cada vez mais baratos e eficientes, as empresas estão investindo em projetos que otimizam algumas variáveis de sua produção. São exemplos projetos que minimizam a massa de uma estrutura mantendo sua integridade física para sua aplicação, a melhor distribuição de volume de um componente mecânico exigindo um deslocamento máximo da peça, ou também a redistribuição espacial de componentes para que determinado conjunto atenda sua função utilizando o menor número de junções para os componentes.

Empresas que desenvolvem fornalhas possuem duas principais formas de construção de seus produtos. Nos casos em que o cliente favorecido do produto possui um grande espaço em sua fábrica sem a necessidade imediata de utilização, a fornalha pode ser montada diretamente no espaço de utilização. A empresa acaba transportando o material e ferramental necessário para a construção e a montagem ocorre de forma imersiva no espaço de utilização da fornalha, dentro da indústria que adquiriu o produto. Muitas vezes a situação descrita no caso anterior não é favorável tanto para a indústria, que deverá isolar uma determinada área de sua produção por um certo tempo, quanto para a empresa responsável pela construção da fornalha, que deverá transportar todo o ferramental e mão de obra necessários para a montagem em um local externo à sua sede. Percebendo essa demanda, as empresas elaboraram uma alternativa em que a montagem ocorre dentro de sua sede e a fornalha é posteriormente transportada para o local de utilização. A construção da fornalha ocorre em uma estrutura metálica que possui a função de transportar o material montado com segurança até seu posto de utilização através de seu içamento por caminhões transportadores. A estrutura é utilizada na montagem e transporte da fornalha e não possui o intuito de ser removida, o que implica em uma utilização única do pórtico.

A empresa fornece fornalhas para o mercado e desenvolve sua montagem dentro de sua própria fábrica com a utilização de uma estrutura metálica para o transporte do produto até seu cliente. Com frequentes projetos de redução de custos e a percepção do engenheiro projetista da estrutura metálica responsável pelo transporte de suas fornalhas de que os perfis estruturais estavam superdimensionados, a diretoria entendeu que os gastos com transporte de suas fornalhas poderiam ser brevemente reduzidos com a alocação de um estagiário em um projeto de redução de massa de seu pórtico para transporte de fornalhas.

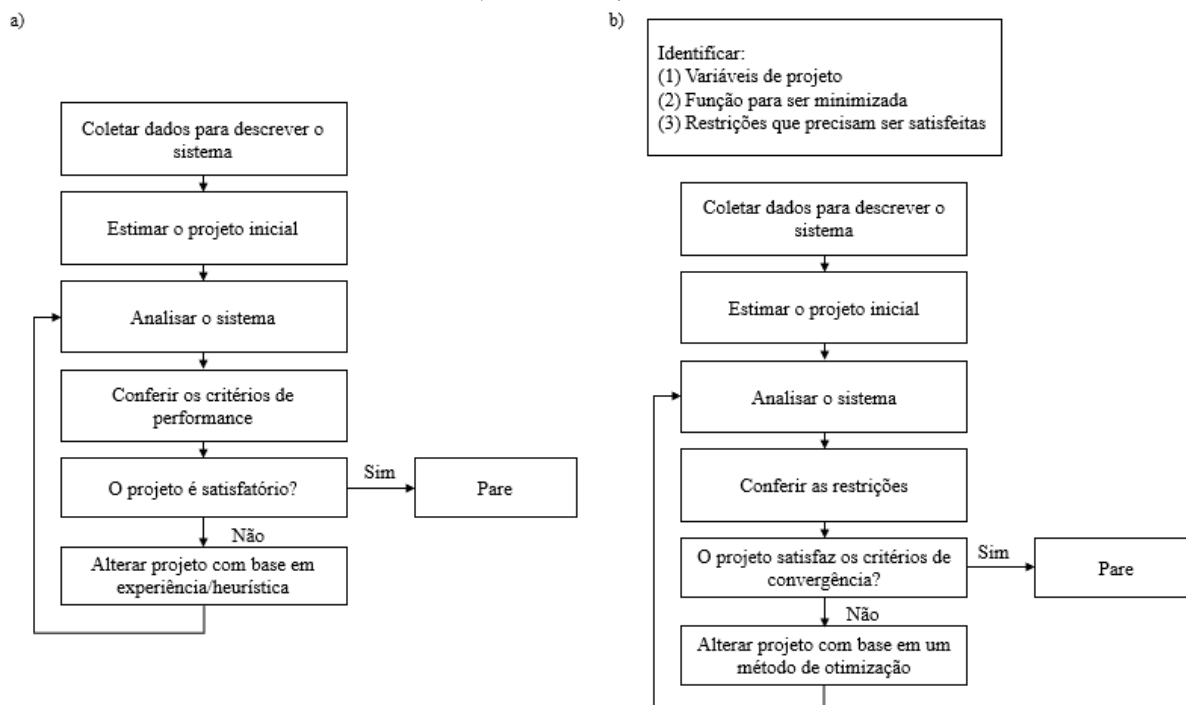
O atual projeto se propõe a redimensionar o pórtico de içamento de fornalhas a casca de arroz através de um algoritmo de otimização paramétrica por um método baseado em gradiente chamado de *Large Scale Optimization Algorithm* com objetivo de minimizar a sua massa, mantendo o seu coeficiente de segurança constante segundo suas solicitações e condições de contorno. Isso significa não ultrapassar sua tensão máxima original depois da reestruturação das vigas que o compõem. O redimensionamento se propõe a alterar as dimensões dos perfis estruturais anteriormente posicionados para envolver a fornalha utilizando apenas dimensões de perfis comerciais, o que não contempla um reposicionamento dos perfis em questão. A determinação das cargas foi estabelecida pelo engenheiro responsável pelo projeto inicial do pórtico e respeitam as ações previstas na NBR 8800.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Projeto Ótimo e Projeto Convencional

Projetar um equipamento ou uma estrutura pode ser um processo bastante complexo. Às vezes, muitas suposições necessitam ser feitas para que o projeto seja analisado através de um modelo e, assim, com a comparação das alternativas pensadas, sejam definidas as especificações de projeto que atendem às condições de utilização do produto em questão. O projeto convencional é aquele que depende da intuição ou da habilidade do projetista e a presença de fator humano pode comprometer sistemas complexos e levar projetos à resultados errôneos [Arora, 2004]. A Figura 2.1 representa um fluxograma de um projeto realizado de forma convencional.

Figura 2.1- Fluxograma de um projeto convencional (a) e de um projeto ótimo (b) (tradução livre) – [Arora, 2004]



A competitividade dos dias atuais para o desenvolvimento de produtos cada vez mais eficientes a um custo cada vez menor associada também à credibilidade que empresas com medidas sustentáveis ganham em seu mercado ao adotarem esse comportamento faz com que projetos estejam voltados para minimizar ou maximizar determinado aspecto, além de atender os pré-requisitos já vistos em projetos convencionais. A metodologia de projeto ótimo procura satisfazer as restrições de projeto minimizando algum aspecto de forma objetiva, podendo ser realizada de forma interativa sem a necessidade de tomada de decisão com base em experiência do projetista.

Ambos os métodos podem ser empregados em diferentes fases de algum projeto. O importante é salientar que um projeto desenvolvido de forma ótima pode ser realizado de forma iterativa por computador e isso só ocorre por conta de que seus procedimentos possuem apenas critérios objetivos.

2.2 Formulação de Projetos de Otimização

Como o projeto ótimo possui caráter objetivo, ele se baseia em traduzir a descrição do problema em uma formulação matemática específica bem definida. Existem cinco procedimentos que, quando seguidos na sequência apresentada, balizam a realização da transcrição de um problema para a formulação de projetos de otimização [Arora, 2004].

2.2.1 Descrição do Problema/Projeto

Essa etapa normalmente é realizada pelo criador ou pelo cliente do projeto. Ela está baseada em descrever os objetivos do projeto e os requisitos a serem atendidos.

2.2.2 Coleta de Dados e Informações

Para realizar a formulação matemática do problema, necessitamos reunir informações de propriedades dos materiais, custos com energia e demais informações que nos auxiliam a definir o problema com maior precisão. É nesta etapa que são realizadas análises através de modelos simplificativos do problema em questão. Aqui são realizadas suposições e hipóteses para resolver o problema de forma eficiente, sem fugir das capacidades da equipe com recursos como material, espaço e tempo estimado para o projeto.

2.2.3 Identificação e Definição de Variáveis de Projeto

Esta etapa possui o objetivo de definir quais parâmetros serão alterados ao longo do fluxograma de projeto para atingir o objetivo de minimização do aspecto escolhido. As variáveis de projeto devem ser, na medida do possível, independentes entre si. Variáveis dependentes devem ser descritas como dependentes através de equações que as correlacionam. O número de variáveis de projeto independentes entre si especifica o número de graus de liberdade que o problema de otimização terá. As variáveis de projeto usualmente são descritas em um vetor, x .

2.2.4 Identificação de um Critério a Ser Otimizado

Esta etapa é designada à identificação de um critério de comparação para as várias soluções que teremos do problema de otimização. Para problemas com um único objetivo, o critério necessita ser uma função escalar em que o seu valor pode ser diretamente obtido quando um projeto é totalmente especificado e deve ser função do vetor de variáveis de projeto x . Esse critério é chamado de função objetivo do problema de otimização e deve ser minimizada ou maximizada conforme os requisitos estabelecidos.

A escolha da função objetivo pode ser complexa por conta de necessitar ser completamente descrita pelas variáveis de projeto. Alguns exemplos de funções objetivo são o custo (a ser minimizado), o lucro (a ser maximizado), a massa (a ser minimizada ou maximizada), o volume de material (a ser minimizado ou maximizado), dentre outros.

2.2.5 Identificação de Restrições

Dentro de projetos, normalmente possuímos recursos finitos para atingir um resultado ideal. A finitude de nossos recursos é matematicamente representada pelas restrições de projeto. Essas restrições podem ser como uma limitação de deslocamento de uma estrutura a

qual deseja-se reduzir a massa, ou então um limite de investimento para um projeto que possui o objetivo de maximizar o lucro. Assim como a função objetivo, as funções de restrições também devem ser completamente descritas pelas variáveis de projeto.

Uma importante classificação de restrições diz que elas podem ser *restrições de igualdade* ou *restrições de desigualdade*. As *restrições de igualdade* definem o espaço da solução com um grau de liberdade a menos que as *restrições de desigualdade*. As restrições definem matematicamente o espaço viável de solução S .

2.3 Mínimo Local e Mínimo Global

Uma dúvida frequente em problemas de otimização é se a solução encontrada fornece o melhor resultado viável ou apenas um dos candidatos a este. Um mínimo pode ser definido matematicamente como um valor da função objetivo multidimensional $f(\mathbf{x}) \in R^n$ descrito por suas variáveis x_1, x_2, \dots, x_n em que seu vetor gradiente é igual ao vetor nulo de tamanho n

$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \vec{0} \quad (2.1)$$

e sua matriz Hessiana

$$\left| \frac{\partial^2 f(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}} \right| > 0 \quad (2.2)$$

avaliada no ponto em questão é positiva definida.

Funções com alto grau de complexidade, comuns em problemas de engenharia, fornecem muitas vezes vários valores que podem ser classificados como mínimos. Todos os valores são candidatos a serem o mínimo global da função, ou seja, o menor valor possível em todo o seu domínio. Cada candidato a *mínimo global* pode também ser chamado de *mínimo local*.

2.4 Otimização Baseada em Gradiente

O Optistruct, solver escolhido para a solução do problema, utiliza do processo iterativo conhecido como *método da aproximação local* para determinar a solução seguindo os passos a seguir:

- Análise do problema físico utilizando elementos finitos.
- Teste de convergência.
- Triagem de resposta para reter respostas potencialmente ativas para a iteração atual.
- Análise de sensibilidade para as respostas retidas.
- Otimização de um problema explícito aproximado com formulação baseada na informação de sensibilidade.

Para atingir uma convergência mais estável, cada variável de projeto assume limites inferiores e superiores. A atualização da configuração é gerada pela solução explícita aproximada do problema de otimização, baseada na informação de sensibilidade. O Optistruct possui duas classes de métodos de otimização: *dual* e *primal*. Métodos *dual* são altamente eficientes para problemas com um grande número de variáveis de projeto e poucas restrições, comuns em problemas de otimização topológica ou de otimização topográfica. Já os métodos *primal* são utilizados em problemas em que o número de restrições é similar ao número de

variáveis de projeto, o que é comum em problemas de otimização paramétrica, como de tamanho e forma. O *solver* escolhe automaticamente o método de otimização através da conferência das características do problema de otimização. O método utilizado no problema foi o método *primal* chamado *Large Scale Optimization Algorithm* (BIGOPT).

Quando o método BIGOPT é selecionado, o *solver* converte um problema de otimização com função objetivo, $f(x)$, no problema equivalente utilizando o método de penalidade

$$\min \Phi(x) = f(x) + r \left(\sum_{i=1}^{m_e} q_i [g_i(x)]^2 + \sum_{i=m_e+1}^m q_i \{\max[0, g_i(x)]\}^2 \right) \quad (2.3)$$

onde, $g_i(x)$ é a função de restrição, m_e é o número de restrições de igualdade, r e q_i são multiplicadores de penalidade.

BIGOPT considera as restrições vinculadas separadamente. Então o problema inicial é convertido em um problema sem restrições. O método de gradiente conjugado de Polak-Ribiere [Polak, 1969] é usado para gerar a direção de busca. Depois que a direção é calculada, uma busca unidimensional pode ser realizada por interpolação parabólica utilizando o método de Brent [Brent, 1973].

O processo de otimização será encerrado quando

$$\|\nabla\Phi\| \leq \varepsilon \quad (2.4)$$

, ou quando

$$\frac{2|\Phi(x^{k+1}) - \Phi(x^k)|}{|\Phi(x^{k+1})| + |\Phi(x^k)|} \leq \varepsilon \quad (2.5)$$

, ou quando o número de iterações supere o número máximo de iterações permitidas. Onde $\nabla\Phi$ é o gradiente de $\Phi(x)$, k é o o número da iteração e ε é o parâmetro de convergência. Cada condição só é válida se a solução for viável, ou seja, as variáveis de projeto se encontram dentro de seu limites inferiores e superiores e as equações de restrição são atendidas.

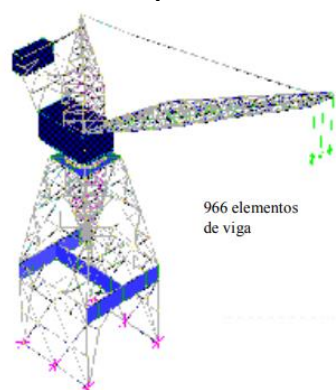
2.5 Análise Global e Local com Elementos Finitos

Muito comumente são utilizados modelos de maior ou de menor complexidade dependendo do problema o qual está sendo modelado. As soluções de problemas reais via equações da elasticidade são extremamente difíceis, se possíveis. Soluções numéricas exigem treinamento intenso e nem sempre fornecem o detalhamento necessário do problema. E experimentos nem sempre são possíveis ou viáveis.

Modelos de pórticos costumam utilizar amplamente modelos simplificados de flexão de vigas para descrever o comportamento da estrutura em tensões ou deslocamentos. Porém, para uma análise detalhada de união entre vigas, por exemplo, este tipo de aproximação não é capaz de descrever a complexidade do estado de tensões em uma região de solda ou uma descontinuidade geométrica, já que as teorias de viga não preveem tais elementos de ligação. A solução é realizar um modelo misto com uma transição do modelo global, que transfere os graus de liberdade para um modelo local, mais detalhado. Cada ponto de influência do

modelo local possui os graus de liberdade associados à teoria estrutural empregada para o modelo global. A Figura 2.2 evidencia um modelo global em que são empregados elementos de viga em sua grande maioria, com o intuito de trazer o panorama geral de deslocamentos e tensões da estrutura.

Figura 2.2 – Exemplo de modelo global



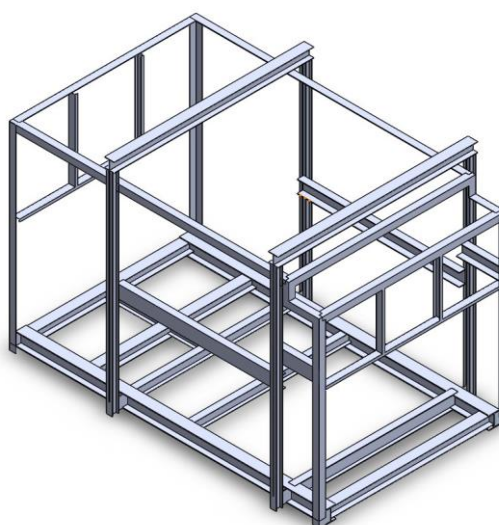
3. CASO DE ESTUDO

Utilizou-se análise computacional pelo Método de Elementos Finitos, a partir da teoria estrutural de elasticidade linear em conjunto com a otimização paramétrica baseada no método de otimização por gradiente para a realização das simulações do presente trabalho. Para tal, empregou-se o *software* HyperWorks. A solução do problema se dá por três etapas: uma análise preliminar da estrutura inicial, um processo de otimização e uma análise da estrutura otimizada.

3.1 Geometria, Material e Condições de Contorno

A geometria da estrutura metálica que envolve a fornalha possui aproximadamente cinco metros de comprimento, três metros de profundidade e três metros de altura. A Figura 3.1 representa a geometria do pórtico desenvolvida em *software* CAD.

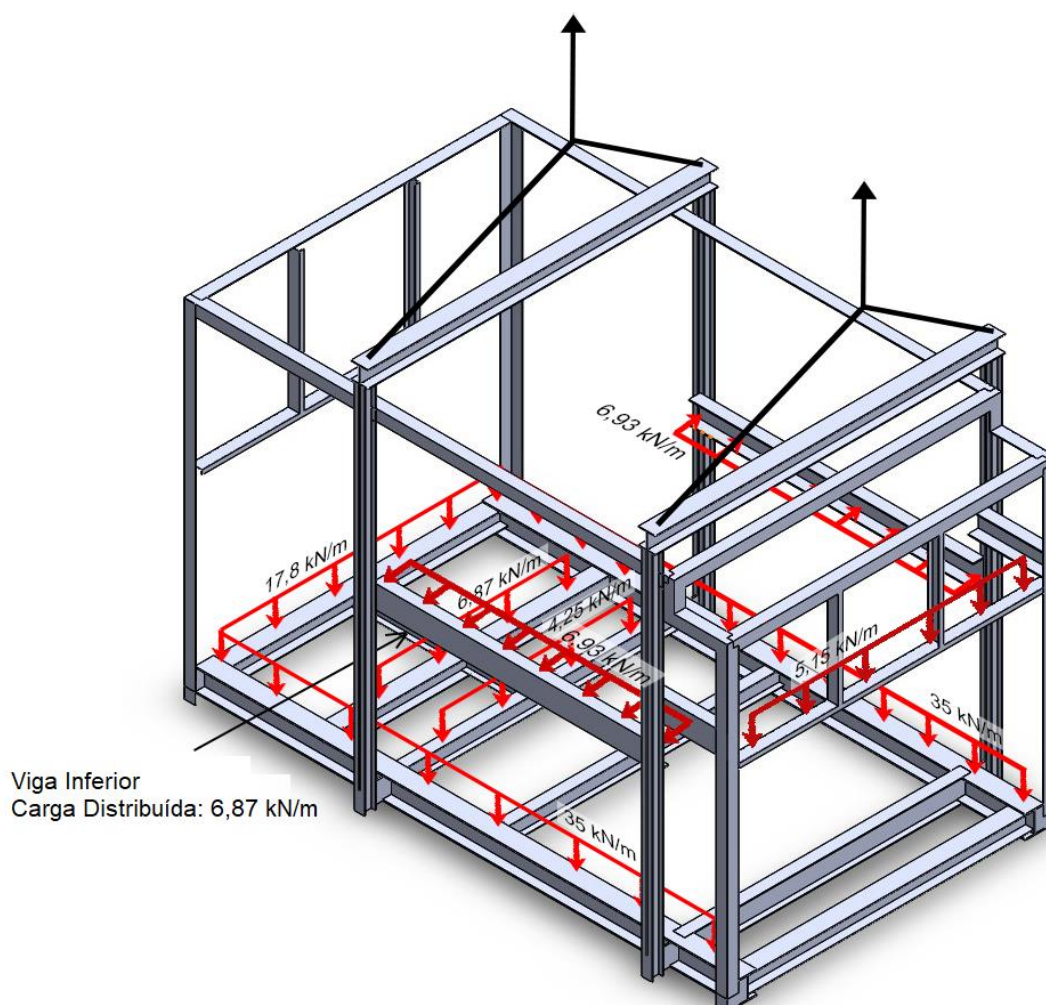
Figura 3.1 – Geometria da estrutura



O material utilizado para os perfis comerciais W é o aço ASTM A 572 grau 50 com limite de escoamento de 345 MPa e resistência à tração de, no mínimo 450 MPa, módulo de elasticidade de 200 GPa e densidade de 7,85g/cm³. Para os demais perfis o aço adotado foi o ASTM A 36, o qual possui limite de escoamento de 250 MPa, módulo de elasticidade de 200 GPa e densidade de 7,85 g/cm³.

As condições de contorno foram pré-estabelecidas pelo engenheiro responsável pelo projeto inicial e elas preveem cargas distribuídas ao longo das vigas representando o material da fornalha. A única restrição de movimento se dá pelos dois pontos de içamento, ligados por cabos de aço à estrutura. As condições de contorno estão detalhadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Condições de contorno



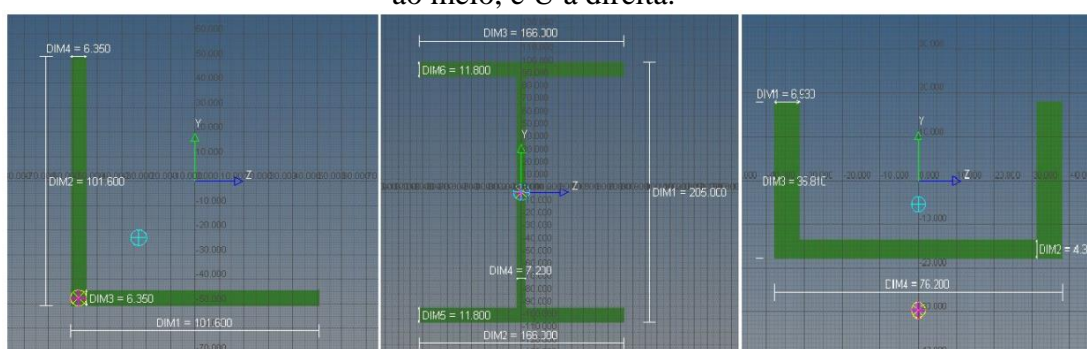
3.2 Modelagem

Visto que os elementos estruturais componentes do problema possuem uma dimensão muito maior que as outras duas, a abordagem para a análise e otimização foi utilizar elementos finitos de viga com formulação de Timoshenko com o elemento CBEAM, que possui seus graus de liberdade expressos na Figura A.1 do APÊNDICE A. Nestes elementos os parâmetros que são inseridos detalham somente os nós inicial e final de cada elemento, e a geometria e orientação da seção transversal.

3.2.1 Geometria e Condições de Contorno

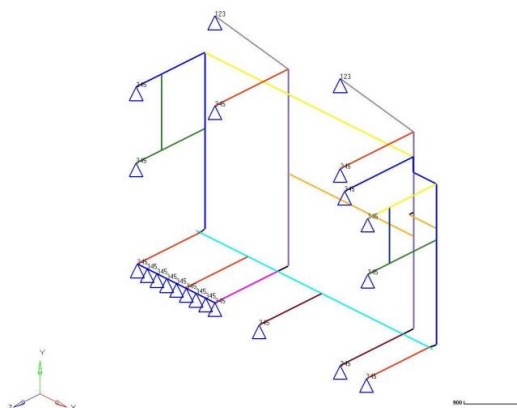
Como a disposição dos perfis não pode ser alterada, define-se a geometria para a otimização apenas pela posição dos nós iniciais e finais de cada perfil estrutural. O sistema de coordenadas para os perfis de tipo L, W e U estão representados na Figura 3.3. Para o posicionamento representativo dos perfis no *software* adota-se que a linha que conecta o nó inicial e final de cada elemento passa pela origem ($y, z = 0$) da representação local de cada seção transversal. Porém o *software* possui como convenção posicionar os elementos no centro de cisalhamento de cada perfil, o que foi ajustado com o comando “*offset*” para a convenção abordada.

Figura 3.3 – Convenção para posicionamento de perfis no modelo. Perfis L, à esquerda, W, ao meio, e U à direita.



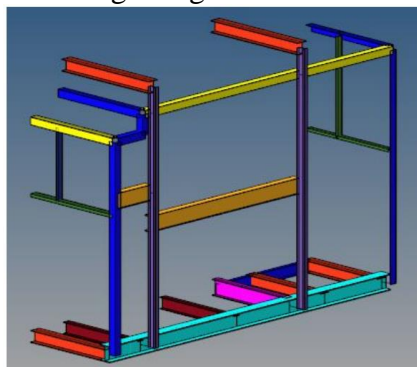
Tendo em vista que tanto a geometria quanto as condições de contorno são simétricas, utiliza-se apenas metade da estrutura aplicando condições que representam as conexões nos nós que dividem a simetria. No modelo, representado na Figura 3.4, foram aplicadas restrições de movimento translacional no eixo z e rotacional nos outros dois eixos nos nós que conectam a outra metade da estrutura. Como convenção o *software* utiliza 1, 2 e 3 para referenciar as translações nos eixos x, y e z, respectivamente, e os valores 4, 5 e 6 para as rotações nos mesmos eixos ordenados da mesma maneira. As restrições são representadas por um triângulo, nesse caso azuis e com os graus de liberdade restringidos simbolizados próximo a cada restrição.

Figura 3.4 – Modelo em elementos finitos de vigas representando a geometria com restrições



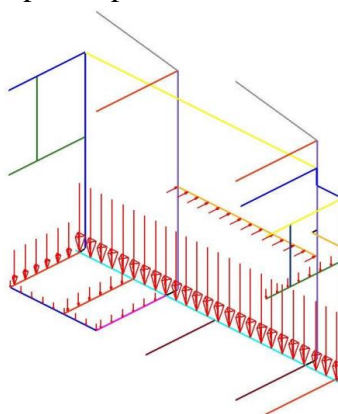
Define-se a orientação com relação ao sistema de coordenadas global de cada perfil, resultando no modelo representativo exposto na Figura 3.5. A orientação dos perfis exposta na Figura 3.5 possui caráter apenas representativo, já que os elementos são unidimensionais e tais fatores entram como valores numéricos no problema. Todos os elementos são definidos com propriedade de viga curta de Timoshenko, que captam flexão, tração, compressão e torção para elementos unidimensionais.

Figura 3.5 – Esquema representativo da orientação da seção transversal de cada perfil ao longo da geometria.



Os carregamentos atribuídos ao modelo são equivalentes aos carregamentos estipulados pelo engenheiro responsável pelo projeto inicial da estrutura metálica, ilustrados na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Representação da aplicação de cargas no modelo. A densidade de cargas por nó foi reduzida na imagem para representar melhor visualmente os detalhes.



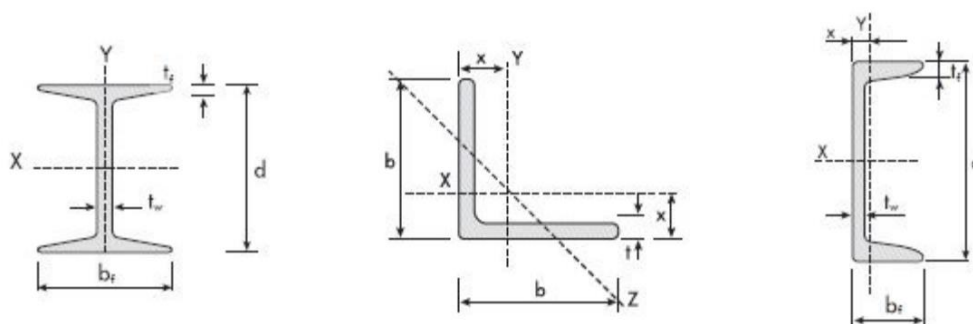
Para simular o içamento por cabos foi utilizado o elemento de barra, que permite somente esforços axiais. A conexão entre o cabo e a estrutura foi considerada como rotulada, pois ele não resiste a solicitações não alinhadas com seu eixo. As demais conexões entre os perfis foram consideradas rígidas. Nas conexões entre perfis que não possuem centros de cisalhamento concorrentes, foram realizadas com elementos rígidos do tipo RBE2, que transmitem todos os graus de movimento entre dois ou mais nós, simulando o comportamento de uma junta soldada. O peso próprio da estrutura foi atribuído por um coletor de carga específico do *software* que através da densidade do material informada e volume dos elementos é calculada a influência da gravidade no modelo.

3.3 Parâmetros para Otimização

Para a otimização paramétrica da estrutura foram utilizadas como variáveis de projeto as dimensões que definem as diferentes seções transversais:

- Perfis W: d (altura), b_f (largura da mesa), t_w (espessura da alma), t_f (espessura da mesa);
 - Perfis L: b (largura), t (espessura);
 - Perfis U: d (altura), b_f (largura da aba), t_w (espessura da alma), t_f (espessura da aba).
- As seções estão descritas com suas respectivas variáveis de projeto na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Variáveis de projeto representadas em cada tipo de perfil estrutural



Cada perfil estrutural possui variáveis de projeto independentes dos demais perfis. A análise foi realizada utilizando o *solver* OptiStruct do pacote HyperWorks e a função objetivo é definida com a intenção de minimizar a massa da estrutura com a seguinte restrição de tensão:

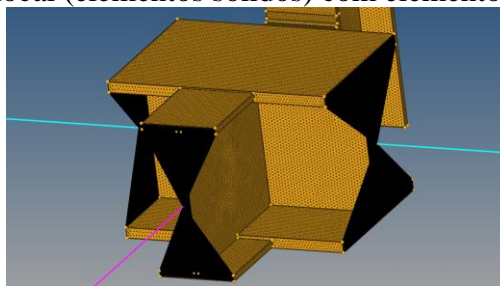
- Restrição de tensão máxima de von Mises para todos os elementos de 200 MPa;

O *solver* OptiStruct utiliza o método dos gradientes para otimização, que lida com variáveis contínuas. Em perfis comerciais os valores nominais catalogados são discretos e para isso foi utilizada uma ferramenta do *software* que ajusta resultados em variáveis contínuas para valores discretos. Além disso, foi utilizada a função DGLOBAL do *software*, que realiza as iterações de diferentes pontos iniciais e posteriormente compara os resultados da função objetivo, aumentando a probabilidade de afirmar que a solução obtida é um mínimo global.

3.4 Análise Local com Elementos Finitos

Para complementar e aprofundar a análise global do pórtico com elementos de viga, o modelo local surge com elementos tridimensionais de segunda ordem para detalhar a região crítica sinalizada pelo modelo global. Os graus de liberdade são transferidos através de elementos rígidos, RBE2, que conectam um nó independente, que advém da malha global, a nós dependentes, que se encontram na seção de transição da malha com elementos de viga para a malha tridimensional. A Figura 3.8 detalha a conexão entre malha local e malha global com elementos RBE2. A malha tridimensional é composta por elementos tetraédricos de segunda ordem, CTETRA. A malha inicial preenchia a menor espessura com dois elementos e, posteriormente, foram realizadas análises com maior refino de malha na região crítica.

Figura 3.8 – Transferência de graus de liberdade entre a malha global (elementos de viga) e a malha local (elementos sólidos) com elementos RBE2.



As cargas presentes na região da malha local foram transformadas de cargas lineares para cargas superficiais, ou seja, aplicadas em uma área. A equivalência das cargas se dá pela soma das forças aplicadas na malha global substituída por elementos sólidos e, posteriormente, aplicada como força de superfície na malha local.

As geometrias das junções de regiões críticas foram adaptadas com filetes para simular um cordão de solda, e para suavizar os resultados na região de descontinuidade.

4. RESULTADOS

Assim como na execução do projeto, os resultados estão expressos na sequência que contempla inicialmente a análise da estrutura inicial, seguindo pela configuração ótima dos perfis, e finalizando pela validação da estrutura otimizada através da reanálise. Os resultados estão expressos em tensões equivalentes de von Mises em MPa.

4.1 Análise da Estrutura Inicial

Para verificar se a estrutura inicial atende aos requisitos de projeto, são comparadas as tensões equivalentes de von Mises com a tensão de escoamento do material dimensionado para a região em questão. Na Figura B.1 do APÊNDICE B estão expressas as tensões do pórtico com uma escala de cores para visualização. A máxima tensão atingida pela estrutura no modelo encontra-se em um ponto em que predominam as tensões axiais por tração e flexão, e tensões de cisalhamento por torção devido à sustentação de grande parcela da estrutura em balanço. A região em balanço coincide com a região que possui maior densidade de material refratário da fornalha por unidade de área no pórtico. É importante notar que o ponto de maior tensão é também um ponto em que os perfis não são soldados diretamente, mas sim, é utilizado um elemento de ligação entre a mesa do perfil vertical e a alma do perfil horizontal. A máxima tensão avaliada no modelo é de aproximadamente 189 MPa, fornecendo um coeficiente de segurança de 1,33 quando tal tensão é comparada com a tensão de escoamento do aço ASTM A36.

4.1.1 Análise Local da Estrutura Inicial

As ligações entre pilares e vigas são sugeridas na NBR 8800 com elemento de ligação soldado entre a mesa do pilar e a alma da viga horizontal. Duas geometrias de ligação foram testadas para a região crítica:

- Ligação feita por chapa de 1 polegada, geometria 1.

- Ligação feita por dois perfis U 6"1A soldados entre suas abas, formando um perfil caixão, e duas chapas de 1 polegada completando o espaço da aba da viga horizontal, geometria 2.

A Figura C.1 do APÊNDICE C representa as duas geometrias testadas com vistas em perspectiva superior e inferior. Já a Figura C.2 do APÊNDICE C mostra os valores de tensão de von Mises em MPa para os modelos locais da estrutura inicial.

É notório que ambas as estruturas superam a tensão de escoamento de 250 MPa para o aço ASTM A36, porém, como a estrutura será utilizada em seu estado-limite apenas duas vezes (ao ser içada até o caminhão e ao ser içada até seu ponto de funcionamento), o escoamento pode ser ultrapassado em pequenas regiões, contanto que não haja ruptura. Sendo assim, a geometria 1 está descartada pois supera o limite máximo de resistência à tração, justamente em um ponto que está sob influência de tração. Para a aprovação da geometria 2 é preciso verificar a convergência de malha. Três novas malhas com maior refino na região crítica formam o gráfico de tensões de von Mises exposto na Figura 4.1 através do caminho detalhado na Figura 4.2. As malhas continham elementos na região de maior refino com aproximadamente 2 mm, 1,8 mm e 1,5 mm de altura.

Figura 4.1 – Convergência de malha para o modelo local da estrutura inicial

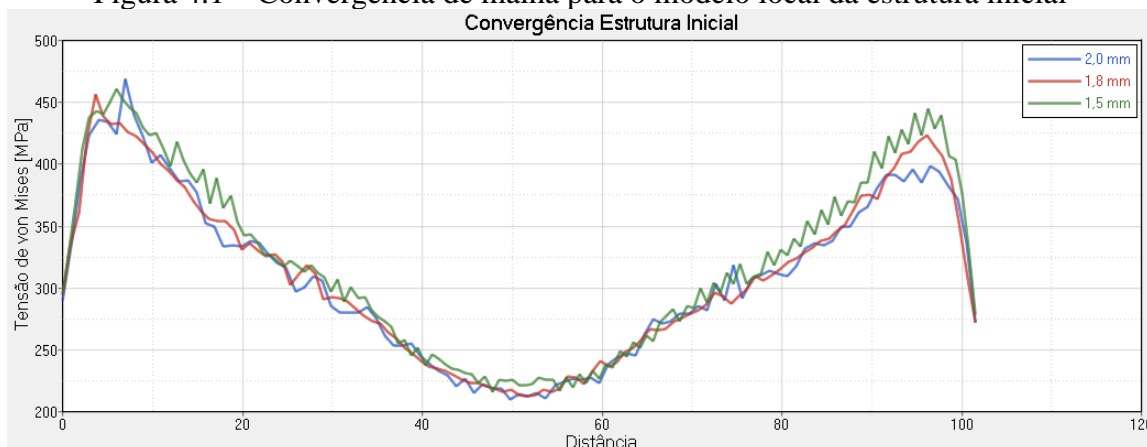
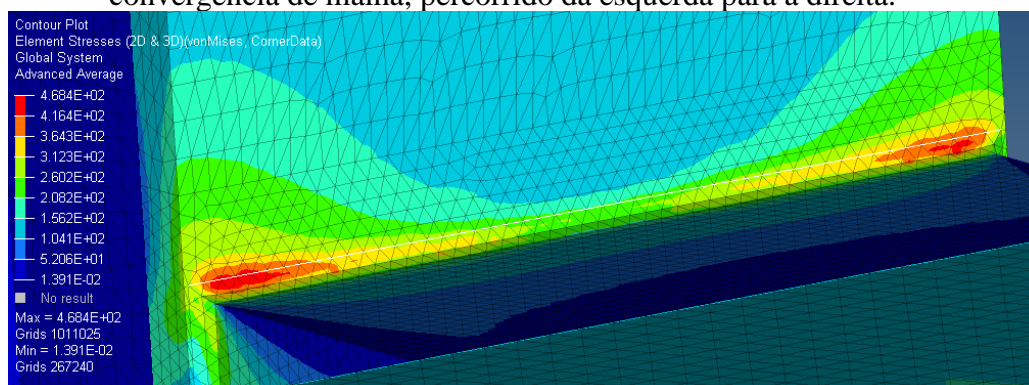


Figura 4.2 – Caminho (linha branca) comum entre as malhas para medição de tensão para convergência de malha, percorrido da esquerda para a direita.



A região escolhida na análise de convergência de malha para o caminho de medição de tensão possui grandes variações de tensão, além de estar localizada na região crítica da união soldada. As três malhas apresentaram uma divergência de aproximadamente 20 MPa entre si na região de 95 mm do caminho percorrido para medição. E a variação entre o menor tamanho de malha, 1,5 mm, e o segundo menor, 1,8 mm, foi ainda menor no mesmo ponto de avaliação. Portanto, a malha de 1,5 mm nos traz resultados satisfatórios para a descrição do

fenômeno físico. A máxima tensão atingida foi de aproximadamente 470 MPa, estando dentro do limite de ruptura por tração do aço ASTM A36 (entre 400 MPa e 550 MPa).

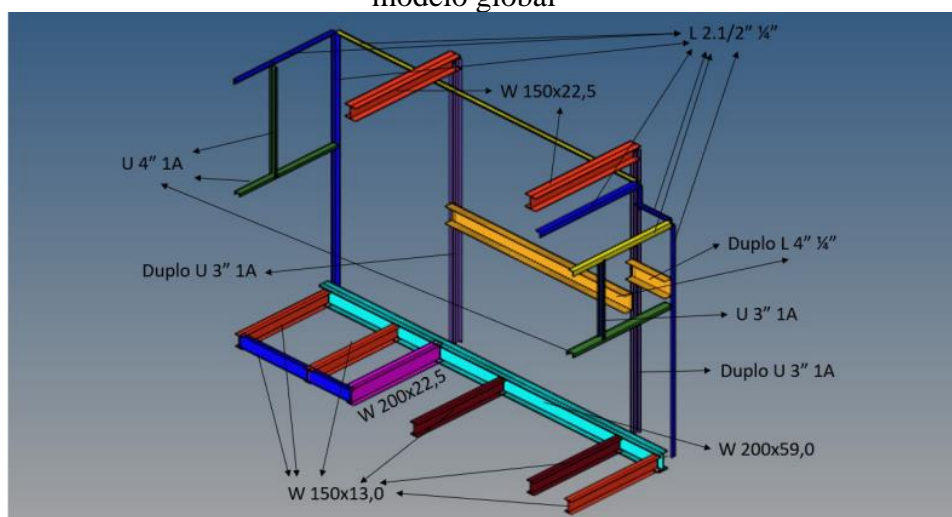
4.2 Processo de Otimização

Como as variáveis de projeto do problema foram atribuídas às dimensões das seções transversais de cada perfil, o resultado combinado das dimensões não necessariamente fornece perfis comerciais diretamente. Para a obtenção dos perfis finais, se é estabelecida uma equivalência dos perfis fornecidos pelo problema de otimização com os perfis comerciais catalogados. Essa equivalência se dá por:

- Área, em perfis com esforços predominantemente normais de tração e compressão;
- Razão entre distância do centro de gravidade até o ponto de maior tensão normal (extremidade da seção) por flexão e o momento de inércia, para perfis com esforços provenientes de flexão.

Com a execução das equivalências são obtidos os perfis finais para a estrutura otimizada. A Figura 4.3 apresenta a configuração dos perfis comerciais para a estrutura após o processo de otimização.

Figura 4.3 – Configuração de perfis para a estrutura otimizada após otimização através do modelo global



Em sua nova configuração, a estrutura possui aproximadamente 1240 kg, 440 kg a menos que a estrutura inicial, representando uma redução de 26%. Como a disposição dos perfis não foi alterada, entende-se que o processo de otimização remodelou áreas pouco solicitadas para trazer tamanha redução de massa. Porém, ainda resta avaliar se a estrutura ainda atende às solicitações.

4.3 Análise da Estrutura Otimizada

Novamente compara-se a máxima tensão atingida pelo modelo com a tensão de escoamento do material para avaliar a integridade da estrutura. Na Figura B.2 do APÊNDICE B estão expostas as tensões de von Mises em MPa para o modelo unidimensional otimizado do pórtico. Conforme a análise através do modelo unidimensional, o pórtico atende às solicitações impostas pela fornalha em posição de içamento. A máxima tensão atingida no

modelo de elementos finitos foi de 193 MPa, trazendo um coeficiente de segurança de 1,29, muito próximo do coeficiente atingido pelo modelo global da estrutura inicial.

4.3.1 Análise Local da Estrutura Otimizada

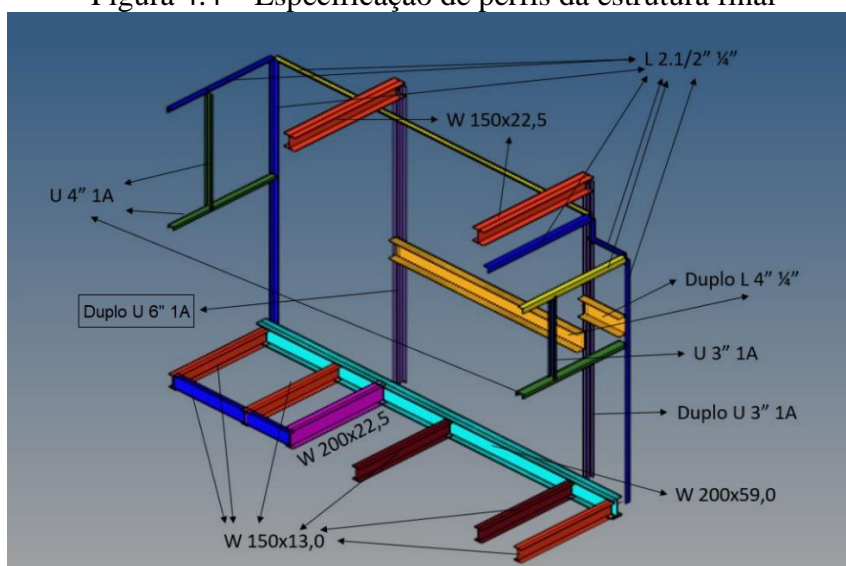
A ligação de geometria selecionada para a região crítica da estrutura otimizada é similar à junção aprovada no pórtico inicial, contendo dois perfis U 3"1^a e duas chapas de 1 polegada nas extremidades. Assim como na análise da estrutura inicial, a malha utilizada possui maior refino na região crítica, com elementos de aproximadamente 1,5 mm de altura. A Figura C.2 do APÊNDICE C representa os valores de tensão de von Mises em MPa para o modelo local da estrutura otimizada.

A máxima tensão atingida no modelo é de aproximadamente 760 MPa e ultrapassa o limite de resistência à tração do material e, portanto, não atende às especificações de integridade. A superação da tensão de referência na região do pilar indica que há uma grande parcela de flexão agindo no cordão de solda.

4.3.2 Ajustes e Reanálise da Estrutura Otimizada

Conhecendo a solicitação predominante, sugere-se alterar os perfis duplo U 3" 1A dos pilares de sustentação próximos à área em balanço por perfis duplo U 6" 1A e, também, alterar o elemento de ligação duplo U 3" 1A por outro perfil duplo U 6" 1A. A nova estrutura foi validada através da análise de tensões com malha similar às malhas desenvolvidas anteriormente, mantendo 1,5 mm de tamanho médio do elemento na região crítica e 4 mm nas demais regiões. As tensões de von Mises da análise local da nova estrutura se encontram na Figura C.3 do APÊNDICE C. A tensão máxima atingida foi de 460 MPa e se encontra dentro das especificações de integridade da estrutura. A Figura 4.4 detalha a configuração final do pórtico.

Figura 4.4 – Especificação de perfis da estrutura final



Assim, a estrutura otimizada final recebe um acréscimo de 42 kg e sua massa total é de 1282 kg, 398 kg (24%) a menos que a estrutura inicial. O pórtico agora conta com uma validação por análise global e local. Entretanto, para validar a funcionalidade do pórtico é necessário realizar as inspeções regulamentadas pela NBR 8800, sendo essa conferência uma sugestão para a continuação do trabalho desenvolvido.

5. CONCLUSÃO

A estrutura otimizada apresentou uma redução em massa de 24%, que trará economias associadas com a compra de material e com custos envolvendo o transporte de fornalhas até seu posto de utilização. Contudo, a estrutura necessita de uma avaliação conforme à NBR 8800 para sua aprovação para utilização, sendo essa uma sugestão de continuação do presente trabalho. O deslocamento máximo de 16,6 mm para um pórtico de aproximadamente 5 m de comprimento confirma que o escoamento não interfere em sua funcionalidade. A Tabela D.1 do APÊNDICE D apresenta um resumo comparativo de diferentes parâmetros avaliados ao longo deste trabalho entre a estrutura inicialmente fornecida e a estrutura após o processo de otimização.

A análise local da estrutura trouxe um grande detalhamento da região crítica do modelo, porém, tal detalhamento só foi possível por conta das simplificações e hipóteses que foram realizadas sobre o fenômeno físico. A modelagem da estrutura completa com apenas elementos sólidos seria uma abordagem inviável em termos de poder computacional e as considerações de simetria e esbeltez dos elementos que compõem o pórtico simplificaram o modelo em inúmeros graus de liberdade.

Problemas de otimização costumam ser processos iterativos e, por conta disso, trabalhosos. Por conta desse fator, é imprescindível que as empresas busquem por algoritmos e técnicas de modelagem de problemas para trazer agilidade aos projetos. No trabalho em questão, a estrutura já estava projetada e o algoritmo de otimização foi implementado como um projeto de melhoria. Porém, a busca pelo máximo desempenho deve estar sempre acompanhada de novos projetos e os algoritmos e métodos se encontram cada vez mais sofisticados para acelerar novas implementações e reduzir retrabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arora, Jasbir S., **Introduction to Optimum Design**, 2004

Polak, E., Ribiere, G, **Note sur la convergence de méthodes de directions conjuguées**, 1969

Brent, R. P, **Algorithms for Minimization Without Derivatives**, 1973.

OptiStruct, Altair; **CBEAM Bulk Data Entry**, 2021, último acesso em 27/04/2022.

Disponível em:

<https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/cbeam_bulk_r.htm>

OptiStruct, Altair; **CBEAM Bulk Data Entry**, 2021, último acesso em 27/04/2022.

Disponível em:

<https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/ctetra_bulk_r.htm>

NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008

Luz, Gelson; **Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química.**, 2022, último acesso em 27/04/2022. Disponível em:

<<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>

Luz, Gelson; **ASTM A572 Propriedades Mecânicas e Composição Química {2022}**, 2022, último acesso em 27/04/2022. Disponível em:

< <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/11/astm-a572-propriedades-mecanicas-e.html>>

APÊNDICE A – Condições de Contorno

Figura A.1 – Graus de liberdade dos elementos CBEAM [OptiStruct, Altair – 2021]

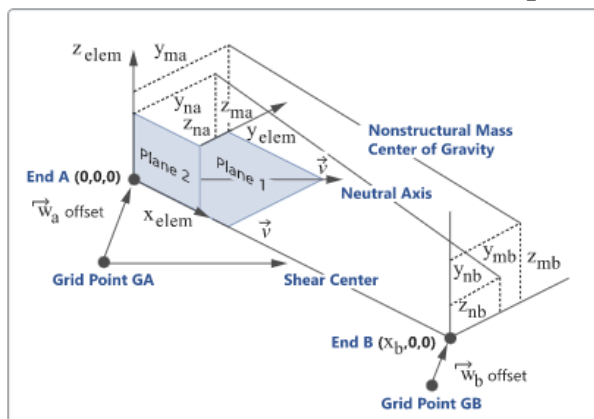


Figure 1. Beam Element Coordinate System

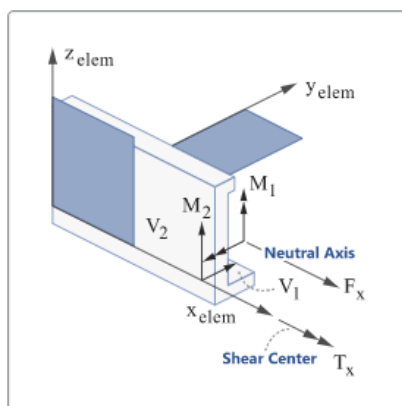


Figure 2. Direction of Internal Forces and Moments (for CBEAM entry)

Figura A.2 – Definição do elemento CTETRA com seus vértices e nós intermediários [OptiStruct, Altair – 2021]

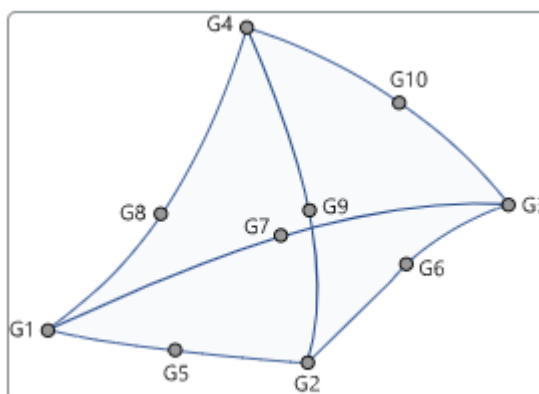


Figure 1. CTETRA Definition

APÊNDICE B – Tensões de von Mises para o modelo com elementos unidimensionais

Figura B.1 – Tensões da estrutura inicial

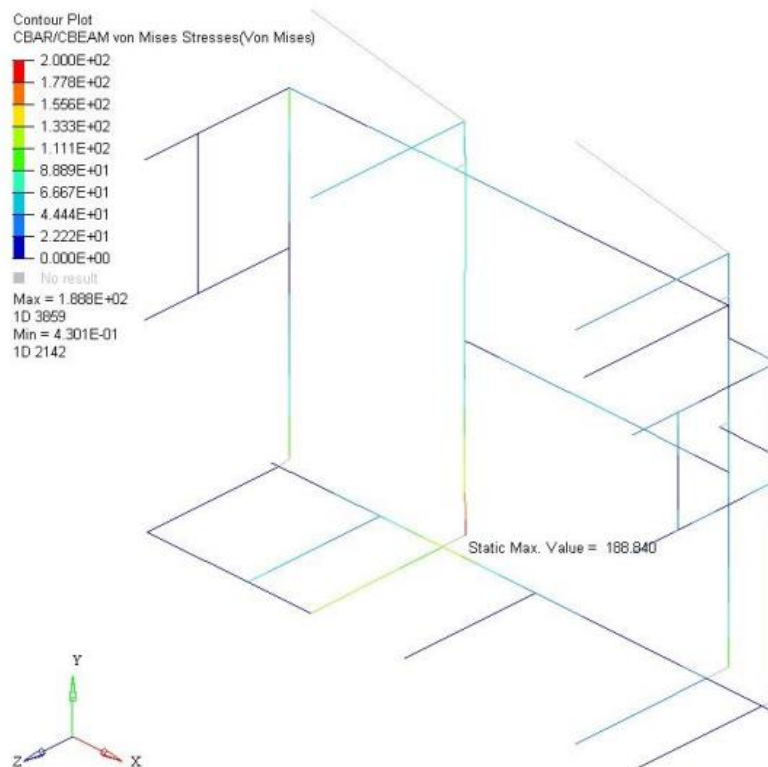
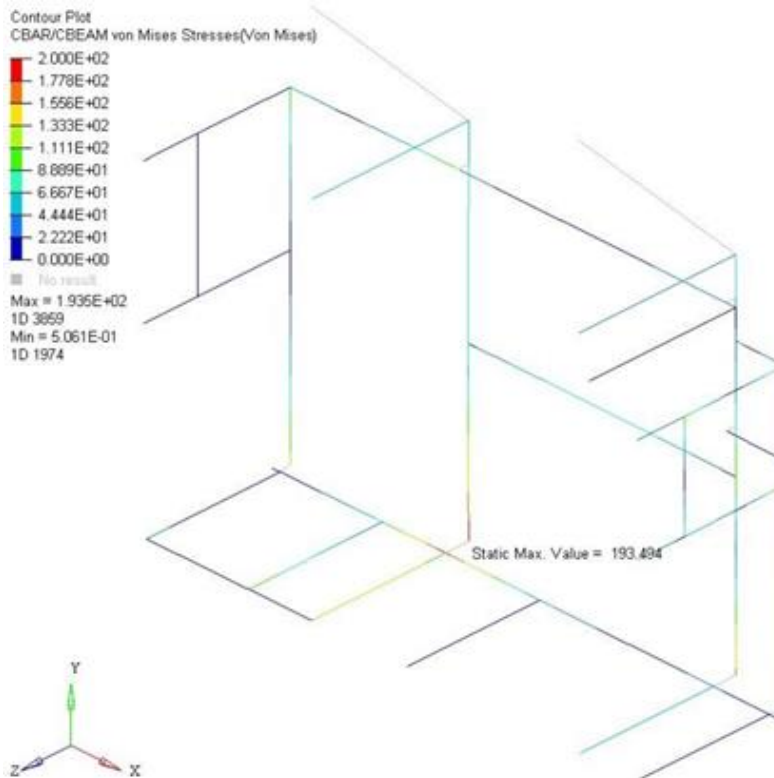


Figura B.2 – Tensões da estrutura otimizada



APÊNDICE C – Modelo Local

Figura C.1 – Vistas em perspectiva da geometria 1, à esquerda, e da geometria 2, à direita. Cada uma consta com sua vista perspectivada superior, acima, e inferior, abaixo.

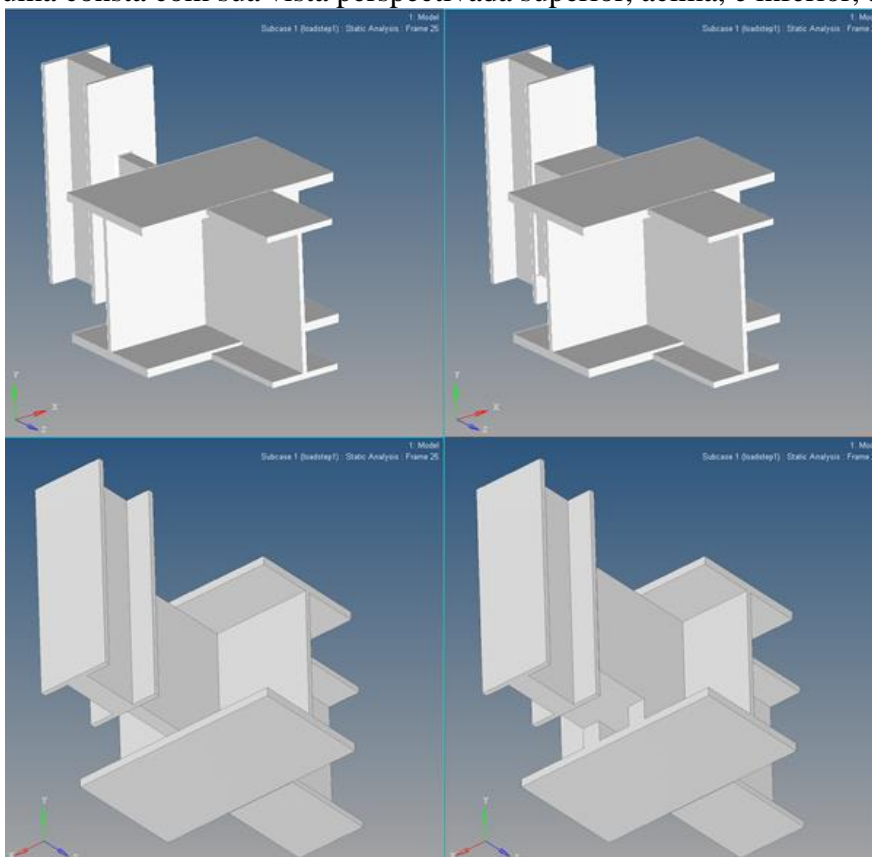


Figura C.2 – Tensões de von Mises para modelo local de elementos sólidos da geometria 1, à esquerda, e geometria 2, à direita.

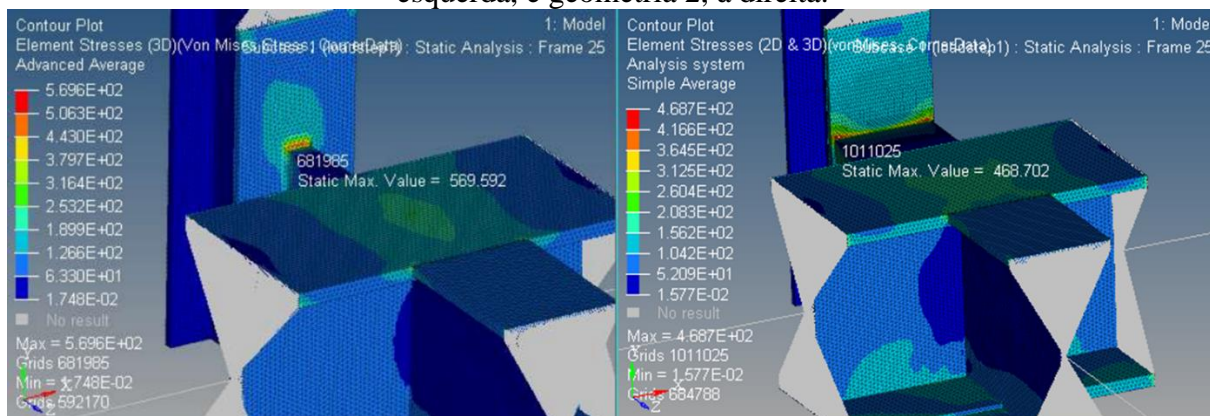


Figura C.3 – Tensões de von Mises para modelo local de elementos sólidos da estrutura após processo de otimização.

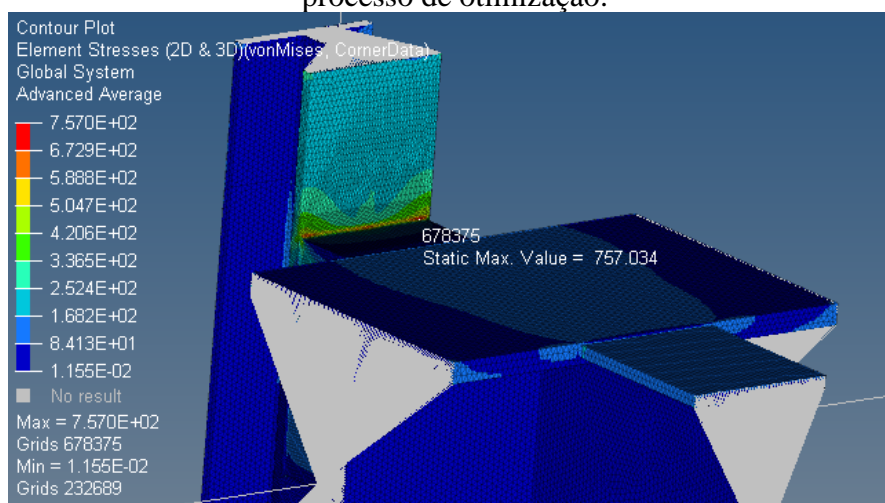
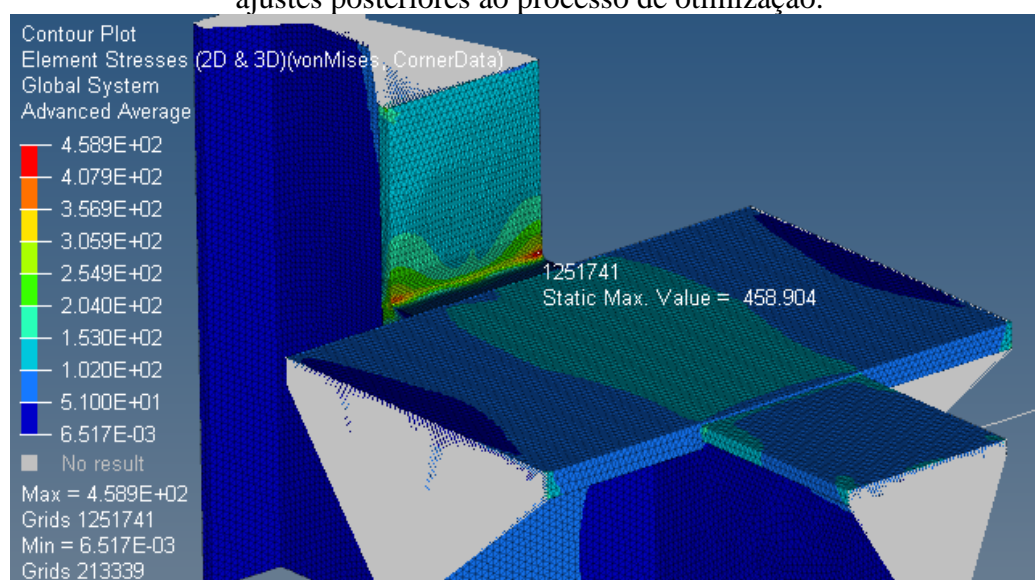


Figura C.4 – Tensões de von Mises para modelo local de elementos sólidos da estrutura após ajustes posteriores ao processo de otimização.



APÊNDICE D – Comparativos

Tabela D.1 – Comparativos entre estrutura inicial e otimizada

	Estrutura Inicial	Estrutura Otimizada
Massa [kg]	1680	1282
Tensão Máxima [MPa]	470	460
Deslocamento Máximo [mm]	12,4	16,6
Coefficiente de Segurança (modelo global)	1,33	1,29