

**GABRIEL MÁXIMO**

**Otimização dos elementos basculantes do sistema pré-aquecedor de um forno EOF  
utilizando o método de elementos finitos**

**Gabriel Máximo**

**Otimização dos elementos basculantes do sistema pré-aquecedor de um forno EOF  
utilizando o método de elementos finitos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

M464o Máximo, Gabriel  
Otimização dos elementos basculantes do sistema pré-aquecedor de um forno EOF utilizando o método de elementos finitos / Gabriel Máximo – Guaratinguetá, 2019.  
48 f : il.  
Bibliografia: f. 47-48

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.  
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Análise de elementos finitos. 2. Fornos. 3. Aço – Indústria. I.Título.

CDU 621

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

**GABRIEL MÁXIMO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi  
UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcio Augusto Martin  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **GABRIEL MÁXIMO**

**NASCIMENTO** 24.02.1994 – Guaratinguetá / SP

**FILIAÇÃO** Cláudio Sidnei Máximo  
Lourdes Adriana dos Santos Pereira Máximo

**2012/2019** Graduação (Engenharia Mecânica)  
Universidade Estadual Paulista

dedicado ao meu avô Sebastião Máximo,  
o Facão

## AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, Adriana e Cláudio, por todo amor a mim dedicado e por tudo o que sou, sem vocês eu jamais teria chegado até aqui;

aos meus avós Sebastião, Bernadete, Tereza e José, por todo apoio, carinho e dedicação para comigo;

à minha companheira Izabela, por todos os momentos vividos juntos e pelos que ainda virão, por todo nosso amor. Sem você eu talvez não tivesse concluído essa graduação;

ao Chico, meu cachorro, pelo eterno companheirismo;

à toda a minha família, por estarem ao meu lado em todos os momentos em que precisei;

à todos os meus professores e professoras que me formaram e me passaram o bem mais precioso da humanidade: conhecimento;

à toda comunidade do Campinho e dos Bonecos Cobiçados, também na Academia seremos lembrados;

à todos os meus camaradas;

ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, que jamais deixou de me incentivar. Sua orientação, dedicação e auxílio foram imprescindíveis para o desenvolvimento desse trabalho;

aos meus companheiros e companheiras de trabalho, em especial à Carlo Geronimi, por todo apoio e auxílio na realização deste projeto;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“A história de toda sociedade até nossos dias é  
a história da luta de classes.”

Karl Marx & Friedrich Engels

## RESUMO

Os fornos EOF de produção de aço, dentre outras características, reaproveitam do calor liberado da carga para pré-aquecer a sucata metálica que será utilizada no processo, utilizando para tal os sistemas pré-aquecedores, os quais são compostos de elementos basculantes refrigerados. Neste presente trabalho é desenvolvido um projeto de otimização desses elementos, com o objetivo de se aumentar a vida útil deles. Identificadas as principais causas das falhas de operação, foi desenvolvido um novo projeto (com a utilização de uma ferramenta de modelagem CAD 3D) a fim de se amenizar os efeitos destas. Em seguida foram realizadas simulações computacionais estruturais estáticas e fluidodinâmicas (baseadas no método de elemento finitos) para se avaliar o desempenho dos projetos original e otimizado. Os resultados obtidos expressaram uma considerável melhora tanto na resistência mecânica, quanto na capacidade de refrigeração do projeto otimizado, o que indica que este terá uma vida útil maior quando em operação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Elementos finitos. Forno EOF. Pré-aquecedor.

## **ABSTRACT**

EOF steelmaking furnaces, among other features, reuse the heat released from liquid steel to preheat the metal scrap that will be used in the process, using the preheat systems, which are composed of rotary cooling elements. In this work is developed a project to optimize these elements, in order to extend their service life. Identified the main causes of the operation failures, it was developed a new project (using a CAD drawing software) to soften their effects. Then static structural and fluid dynamics computational simulations were performed (based on the finite element method) to evaluate the performance of the original and optimized designs. The results expressed a considerable improvement in both mechanical strength and cooling capacity of the optimized design, which indicates that it will have a longer service life when in operation.

**KEYWORDS:** EOF Furnace. Finite elements. Scrap Preheater. Steelmaking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do forno EOF simplificado.....	15
Figura 2 – Desenho de montagem do elemento no forno nas posições aberto e fechado .....	16
Figura 3 – Peça retirada de operação .....	17
Figura 4 – Elementos em operação (posição aberta) .....	20
Figura 5 – Distribuição da carga de sucata sobre os elementos do sistema pré-aquecedor.....	23
Figura 6 – Diagrama de corpo livre dos elementos mais solicitados .....	24
Figura 7 – Desenho CAD 3D do projeto original .....	25
Figura 8 – Vista explodida do desenho CAD 3D do projeto original .....	25
Figura 9 – Desenho CAD 3D do projeto original com cordões de solda .....	26
Figura 10 – Desenho CAD 3D do projeto otimizado .....	28
Figura 11 – Vista explodida do desenho CAD 3D do projeto otimizado .....	29
Figura 12 – Configuração de contato do tipo <i>bounded</i> no ANSYS .....	30
Figura 13 – Detalhes da malha para simulação estrutural do projeto original .....	31
Figura 14 – Condição de contorno <i>Force</i> .....	32
Figura 15 – Condição de contorno <i>Displacement</i> .....	32
Figura 16 – Condição de contorno <i>Cylindrical Support</i> .....	33
Figura 17 – Modelos CAD 3D do circuito interno de escoamento da água .....	34
Figura 18 – <i>Named Selections</i> : (a) <i>INLET</i> ; (b) <i>OUTLET</i> ; (c) <i>WALLS</i> .....	35
Figura 19 – Detalhe da malha para CFD com <i>Inflation</i> nas paredes .....	35
Figura 20 – Resultado da tensão equivalente de Von Mises do projeto original .....	37
Figura 21 – Resultado do deslocamento do projeto original .....	38
Figura 22 – Resultado da tensão equivalente de Von Mises do projeto modificado .....	39
Figura 23 – Resultado do deslocamento do projeto modificado .....	39
Figura 24 – Resultado da pressão da água dos projetos original (a) e modificado (b) .....	41
Figura 25 – Resultado da velocidade da água dos projetos original (a) e modificado (b) .....	42
Figura 26 – Resultado do coeficiente de transferência térmica por convecção dos projetos original (a) e modificado (b) .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de operação da peça .....	22
Tabela 2 – Comparação das propriedades mecânicas e térmicas dos aços ASTM A36 e SAE 4340 à temperatura de 20°C .....	27
Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações estruturais .....	40
Tabela 4 – Comparação dos resultados das simulações fluidodinâmicas .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRI	Direct Reduced Iron
EAF	Electric Arc Furnace
EM	European Standard
EOF	Energy Optimizing Furnace
HBI	Hot Briquetted Iron
LD	Linz-Donawitz
MEF	Método de Elementos Finitos
MG	Minas Gerais
OHF	Open Hearth Furnace
SAE	Society of Automotive Engineers
SP	São Paulo
UNS	Unified Numbering System

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área
$D_h$	diâmetro hidráulico
h	coeficiente de transferência térmica por convecção
k	condutividade térmica
Nu	número de Nusselt
Pr	número de Prandtl
Q	vazão volumétrica
Re	número de Reynolds
V	velocidade
$\mu$	viscosidade dinâmica
$\rho$	massa específica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE CASO	14
1.2	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA</b>	19
2.1	FORNO EOF	19
<b>2.1.1</b>	<b>Sistema pré-aquecedor de sucata</b>	19
2.2	O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	20
<b>2.2.1</b>	<b>Conceituação</b>	20
<b>2.2.2</b>	<b>Breve histórico</b>	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	22
3.1	ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	22
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO OTIMIZADO	24
3.3	SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS ESTÁTICAS	29
3.4	SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS (CFD)	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	37
4.1	SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS ESTÁTICAS	37
4.2	SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS (CFD)	40
4.3	AVALIAÇÃO FINAL	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	45
5.1	CONCLUSÃO	45
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	<b>REFERÊNCIAS</b>	46

# 1 INTRODUÇÃO

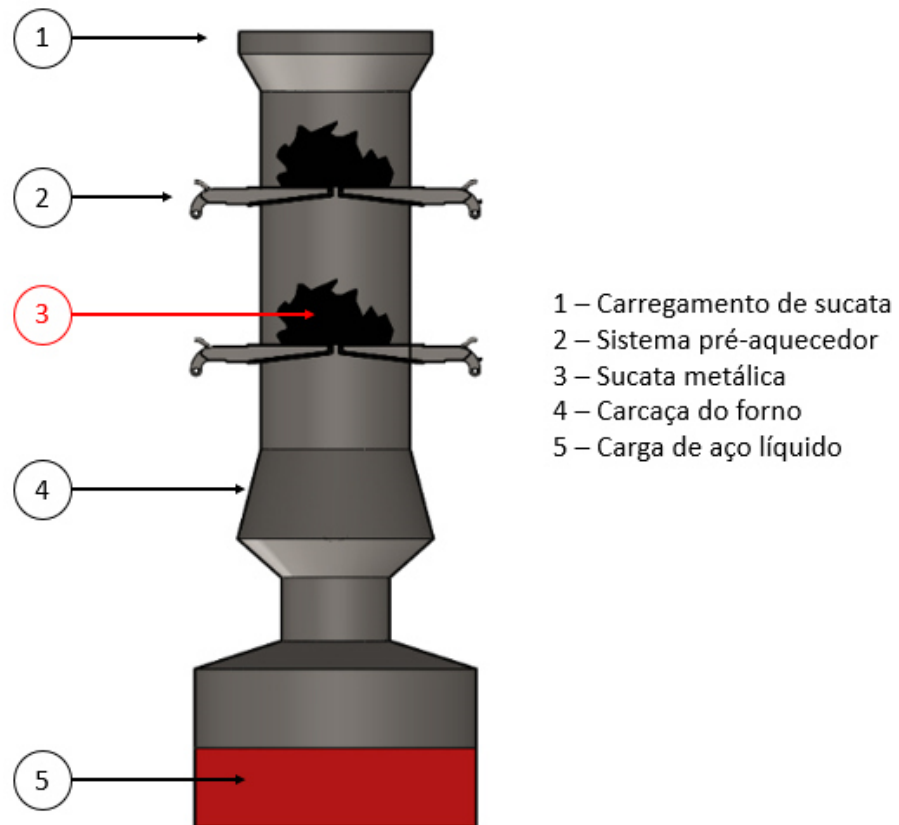
## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE CASO

O setor industrial siderúrgico de produção de aço utilizou durante os anos 1850 até 1960 as tecnologias de conversores Bessemer e os fornos de soleira aberta (OHF – *Open Hearth Furnace*) nos seus processos. A partir da década de 1960, essas duas tecnologias passam a ser substituídos pelos conversores LD (processo Linz-Donawitz, ou *Basic Oxygen Furnace* – BOF), mais rápidos e mais adequados para plantas grandes. Para plantas menores, começam a ser utilizados os fornos a arco elétrico (EAF – *Electric Arc Furnace*) por serem menores e mais econômicos. As duas tecnologias (BOF e EAF) passam a ser responsáveis por 95% da produção de aço. Em meados dos anos 1970 surge no Brasil uma nova tecnologia de fornos para produção de aço, o forno EOF (em inglês, *Energy Optimizing Furnace*) desenvolvido no grupo KORF. O qual foi projetado atrelando as vantagens do conversor LD e do forno EAF. Sendo a primeira unidade instalada no ano de 1982, na cidade de Divinópolis-MG, e que está em operação até hoje. A partir de então, novas unidades do forno EOF começam a ser instaladas ao redor do mundo, em países como Estados Unidos da América, Índia e Itália.

Sendo um forno industrial de refino que produz aço líquido a partir de uma carga combinada de ferro gusa líquido e sucata de aço, o EOF trabalha com uma combinação de sopros de oxigênio atmosférico e submerso, sucata de aço pré-aquecida e fluxos para formação de escória. Por reutilizar grande parte do calor sensível liberado de todas as suas reações, diz-se que é um forno de otimização de energia, sendo o reaproveitamento do calor (gás) liberado da carga para pré-aquecer a sucata metálica que será utilizada no processo, uma das principais delas.

Na Figura 1 tem-se um esquema básico simplificado de um forno EOF, na qual observa-se que o sistema de abastecimento de sucata fica exatamente acima da carga de aço líquido (14 m aproximadamente). E que há dois níveis de pré-aquecimento (o número de níveis, ou sistemas pré-aquecedores, pode variar de forno para forno, normalmente de um a três níveis, no máximo), nos quais a sucata é despejada sobre, permanece em repouso por alguns instantes até ser aquecida à cerca de 900°C, e em seguida é liberada para dentro da carga de aço líquido na parte inferior do forno.

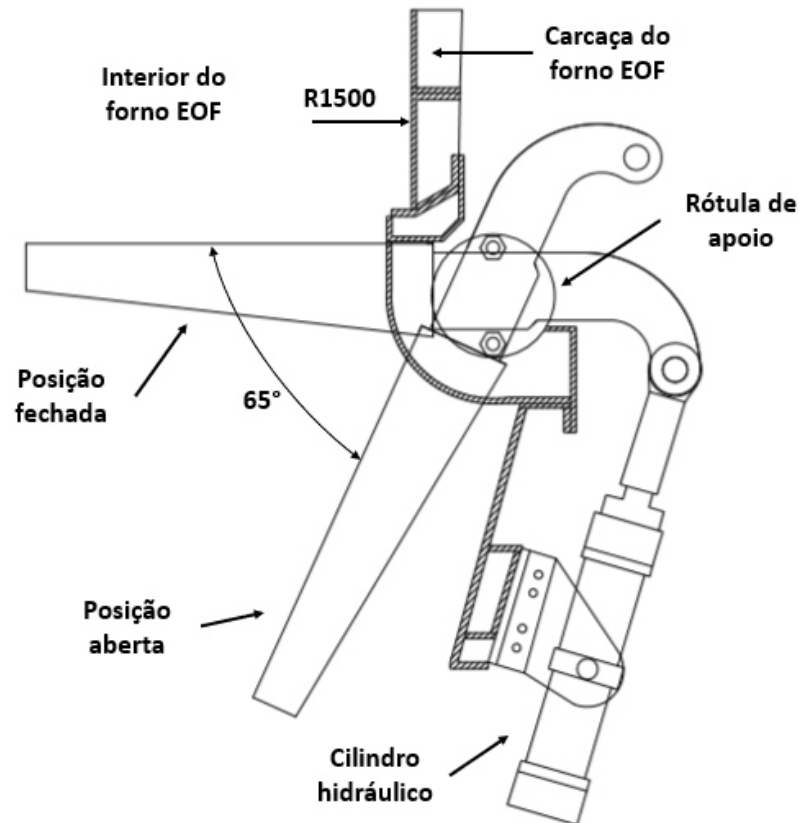
Figura 1 – Desenho esquemático do forno EOF simplificado



Fonte: Autoria própria (2019).

Cada um desses sistemas pré-aquecedores é composto por 16 elementos basculantes (8 de cada lado) refrigerados à água, que inicialmente ficam posicionados na horizontal para receber a carga de sucata, e posteriormente, quando acionados por cilindros hidráulicos, giram quase até a posição vertical, liberando a sucata para a próxima etapa do processo. A Figura 2 mostra as duas posições (fechado e aberto) dos elementos, assim como sua montagem na carcaça e a conexão com o cilindro hidráulico.

Figura 2 – Desenho de montagem do elemento no forno nas posições aberto e fechado



Fonte: Autoria própria (2019).

Recentemente, uma grande siderúrgica nacional – neste trabalho aqui chamada de empresa cliente – que utiliza um forno EOF em seu processo de produção, procurou a empresa CECAL Indústria e Comércio Ltda., localizada em Lorena-SP, para um projeto de otimização dos elementos do sistema pré-aquecedor. pois eles têm falhado excessivamente em operação. Fabricados inteiramente com chapas de aço estrutural soldadas, têm apresentado grandes deformações na extremidade que fica dentro do forno, o que provoca trincas nas soldas permitindo que haja vazamentos da água de refrigeração (que circula pelo interior do elemento) para dentro do forno, fazendo com que a peça tenha que ser substituída, conforme mostrado na Figura 3. O presente trabalho apresenta um projeto de otimização do projeto original desses elementos utilizando ferramentas computacionais de modelagem CAD 3D e de simulação computacional estrutural estática e fluidodinâmica (CFD) baseadas no método de elementos finitos.

Figura 3 – Peça retirada de operação



Fonte: Autorial própria (2019).

## 1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar um projeto de otimização do projeto original dos elementos basculantes refrigerados de um sistema de pré-aquecimento de sucata de um forno EOF de produção de aço, afim de se aumentar a vida útil dos mesmos, através de ferramentas computacionais de modelagem CAD 3D e de simulações estrutural estática e fluidodinâmica (CFD) baseadas no método de elementos finitos.

Sendo os objetivos específicos:

- i. Desenvolvimento da geometria CAD do projeto otimizado já com as modificações baseadas num estudo das condições de contorno da peça e do seu histórico de falhas;
- ii. Simulações estruturais estáticas dos projetos original e otimizado, e posterior análise comparativa dos resultados;
- iii. Simulações fluidodinâmicas (CFD) dos escoamentos dos sistemas de refrigeração dos projetos original e otimizado, e posterior análise comparativa dos resultados.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na introdução deste trabalho é apresentado e contextualizado o problema a ser estudado, bem como os objetivos geral e específicos.

Na seção de revisão teórica é feita uma apresentação mais detalhada do forno EOF e, principalmente do sistema pré-aquecedor de sucata, além de uma breve conceituação do método de elementos finitos e da sua aplicação em simulação computacional, além de um breve histórico do seu desenvolvimento.

Na seção metodológica é descrito detalhadamente todo o problema, as simplificações adotadas, as alterações feitas no projeto original, e a descrição detalhada das etapas das simulações estrutural estática e fluidodinâmica (CFD).

A seguir, na seção de resultados são apresentados e discutidos os resultados das simulações computacionais, avaliando-se as alterações propostas.

Por último, na conclusão é feita uma breve recapitulação de todo o trabalho apresentado, bem como uma sucinta avaliação dos resultados finais.

## **2 REVISÃO TEÓRICA**

### **2.1 FORNO EOF**

Segundo a Minitecnologias Ltda. (2019), uma empresa fabricante de fornos EOF, esse tipo de forno de produção de aço líquido em diversas qualidades e de alta pureza, a partir de uma carga combinada de ferro gusa líquido e sucata de aço, propriamente dito, é um forno de refino que trabalha com uma combinação de sopros de oxigênio atmosférico e submerso em uma carga inicial de ferro gusa líquido, sucata de aço pré-aquecida e fluxos para formação de escória. Entre suas vantagens estão a grande flexibilidade da mistura da carga metálica (ferro gusa, sucata, DRI - Direct Reduced Iron, HBI - Hot Briquetted Iron), a não utilização de energia elétrica para a fusão, alta produtividade, baixa quantidade de resíduos no aço, dentre outras que fazem dessa tecnologia uma das de mais baixo custo.

Diz-se que é um forno que otimiza a energia pois tem alta reutilização do calor sensível de todas as suas reações, sendo uma das principais delas a reutilização do calor liberado (gás) da carga de aço líquido, que fica na parte inferior do forno, para pré-aquecer as sucatas de aço (até cerca de 900°C) que serão combinadas com o ferro gusa para produzir o aço. Para realizar esse pré-aquecimento, a sucata fria é despejada do topo do forno sobre um sistema formado por elementos basculantes refrigerados, chamado de sistema pré-aquecedor.

#### **2.1.1 Sistema pré-aquecedor de sucata**

O sistema pré-aquecedor de sucata do forno EOF estudado é composto por 16 elementos basculantes (8 de cada lado), mostrados na Figura 4 (em operação no forno), fabricados inteiramente em aço estrutural ASTM A36 e refrigerados à água (que escoar por câmaras internas), que são apoiados na carcaça do forno por uma rótula parafusada e acionados por cilindros hidráulicos. No momento em que a carga de sucata é despejada a partir do topo do forno esses elementos estão posicionados na horizontal (posição fechada) e após essa sucata ter sido aquecida até 900 °C aproximadamente, eles são acionados por um cilindro hidráulico e giram até a posição vertical (posição aberta), liberando a sucata para a próxima etapa do processo.

Figura 4 – Elementos em operação (posição aberta)



Fonte: Autoria própria (2019).

## 2.2 O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

### 2.2.1 Conceituação

Dentre os diversos métodos numéricos existentes usados na engenharia para resolução de problemas, Lotti et al. (2006) coloca que “em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados”.

Sendo uma definição mais voltada à engenharia:

Nesse método de análise, uma região complexa definindo um meio contínuo é transformada em formas geométricas simples e discretas, chamadas elementos finitos. As propriedades dos materiais e as relações governantes são consideradas sobre esses elementos e expressas em termos de valores desconhecidos em pontos específicos dos elementos. Um processo de montagem, considerando o carregamento e os vínculos, resulta em um conjunto de equações. A solução dessas equações nos dá o comportamento aproximado do meio contínuo. (CHANDRUPATLA; BELEGUNDU, 2014, p. 1)

### **2.2.2 Breve histórico**

O método de elementos finitos (MEF) foi inicialmente desenvolvido a partir de pesquisas na área de estruturas de aeronaves, na década de 1950. Sendo um dos primeiros artigos contemplando as principais ideias do método tendo sido publicado em 1956 por M. J. Turner, R.W. Clough, H. C. Martin e L.J. Topp, no qual apresentaram seus resultados para derivações de matrizes de rigidez para treliça, viga e outros elementos. Posteriormente, foi descoberto um artigo de Richard Courant, de 1943, no qual ele utilizou uma interpolação polinomial por partes com elementos triangulares para modelar problemas de torção e vibração. Por consequência, muitos matemáticos afirmam que essa foi a descoberta original do método.

A partir de então o MEF passa a ser amplamente utilizado para aproximar soluções principalmente de análise de tensões, escoamento de fluidos e transferência de calor, entre outros, em diversas áreas. Sua aplicabilidade aumenta constantemente, sendo atualmente utilizado desde análises de tensões e térmica de peças industriais, até análises sísmicas de represas e cidades, análises de impacto de transportes (carros, trens e aeronaves), análises de sistemas de ventilação, análises eletromagnéticas de antenas e transistores e até em procedimentos cirúrgicos e ortodontia. Sendo constantemente aperfeiçoado e expandido para diversas aplicações, assim como os programas computacionais que o utilizam para simulação vêm evoluindo e buscando aperfeiçoar as análises, melhorar a escolha dos tipos de elementos e a geração da malha, as técnicas de modelagem, os critérios de aceitação, erros e a apresentação dos resultados.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Primeiramente, foi feita uma compilação e organização de todos os dados e informações de operação da peça enviados pela empresa cliente, conforme mostrado na Tabela 1.

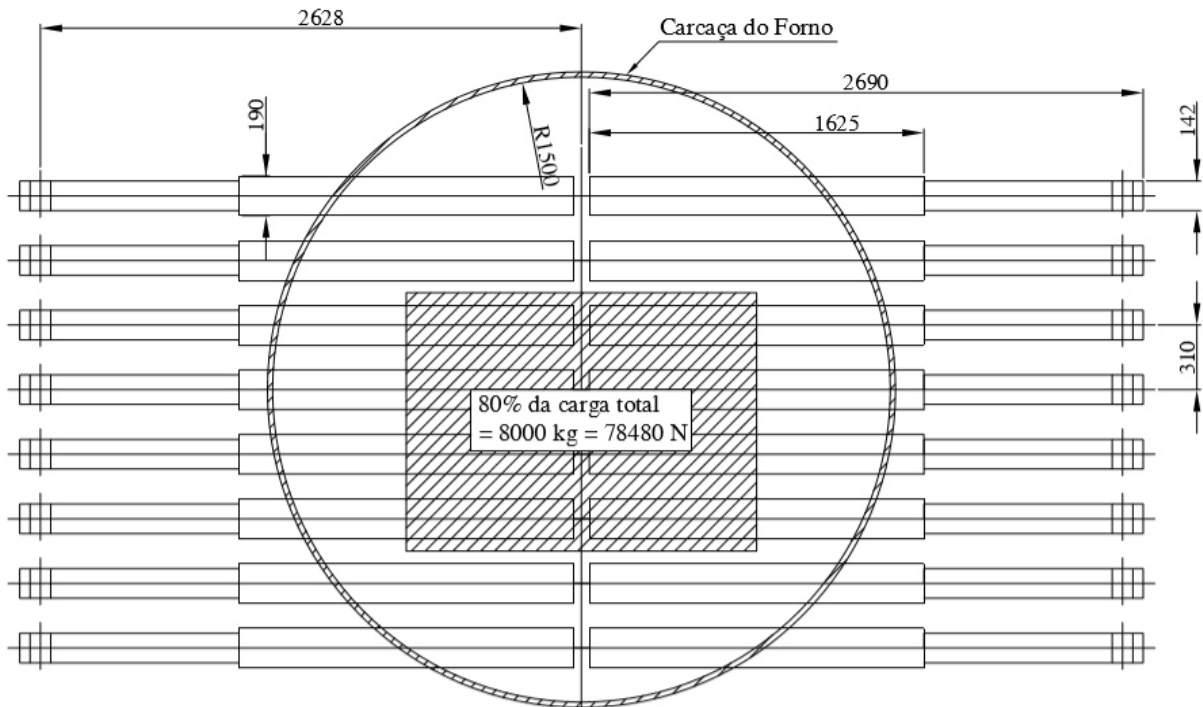
Tabela 1 – Condições de operação da peça

<b>Temperatura ambiente na região dos elementos</b>	1000°C
<b>Massa da carga de sucata despejada por vez</b>	8000 kg à 10000 kg
<b>Distribuição da carga de sucata</b>	Entre 60-80% recai sobre os 8 garfos centrais (em suas metades que tendem ao centro do forno)
<b>Temperatura de entrada da água de refrigeração</b>	38-44°C
<b>Temperatura de saída da água de refrigeração</b>	53-61°C
<b>Pressão da água de refrigeração</b>	Entrada = 1,5 bar Saída = 0,5 bar
<b>Vazão da água de refrigeração</b>	160 m <sup>3</sup> /h total (10 m <sup>3</sup> /h cada elemento)

Fonte: Autoria própria (2019)

A partir das informações do valor da carga de sucata liberada sobre os elementos e de sua distribuição no interior do forno foi feito um desenho de mapeamento da mesma, mostrado na Figura 5, a fim de se avaliar quais são os elementos mais solicitados mecanicamente. Tendo-se em conta que cada nível é composto por 16 peças (8 de cada lado), definiu-se selecionar o elemento mais solicitado, otimizá-lo e replicar os resultados para os outros 15.

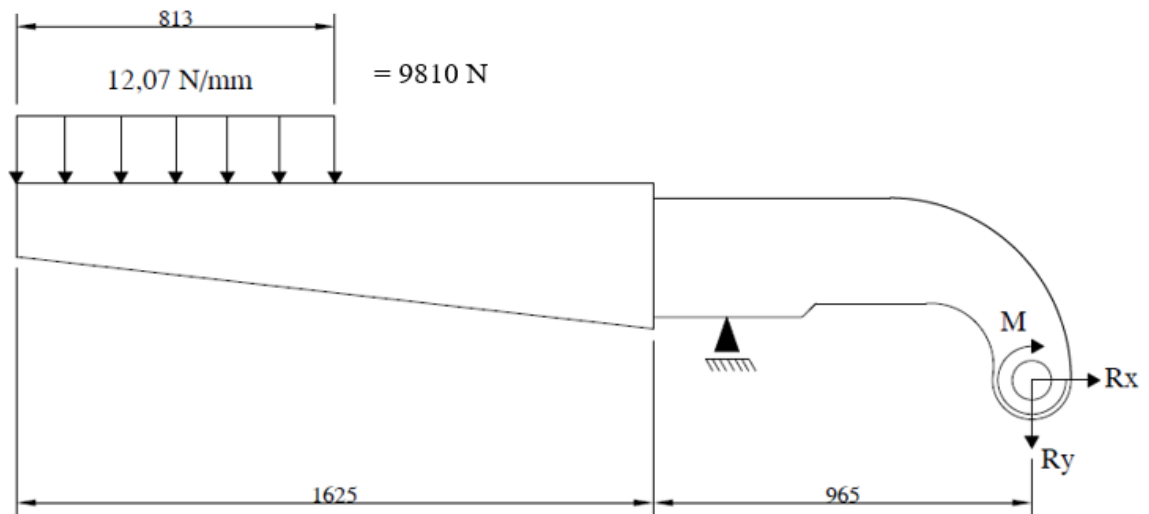
Figura 5 – Distribuição da carga de sucata sobre os elementos do sistema pré-aquecedor



Fonte: Autoria própria (2019).

Da distribuição da carga mostrada na Figura 5, avaliou-se que os oito elementos centrais são os mais solicitados (igualmente), sendo que 80% do valor da carga total, 8000 kg, recaem sobre eles, o que equivale a 78480 N. Dividindo esse valor pelo número de elementos mais solicitados (8), definiu-se a carga em cada um igual a 9810 N. Com a informação de que essa carga se distribui toda sobre as metades das superfícies superiores que tendem ao centro do forno, definiu-se a distribuição e posicionamento desta. Da Figura 2, que mostra a montagem da peça no forno, identificou-se a região de apoio dos elementos na carcaça e o ponto de conexão com os cilindros hidráulicos que os aciona para cima e para baixo. Definindo-se assim todas as condições de contorno do problema, mostradas no diagrama de corpo livre apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de corpo livre dos elementos mais solicitados



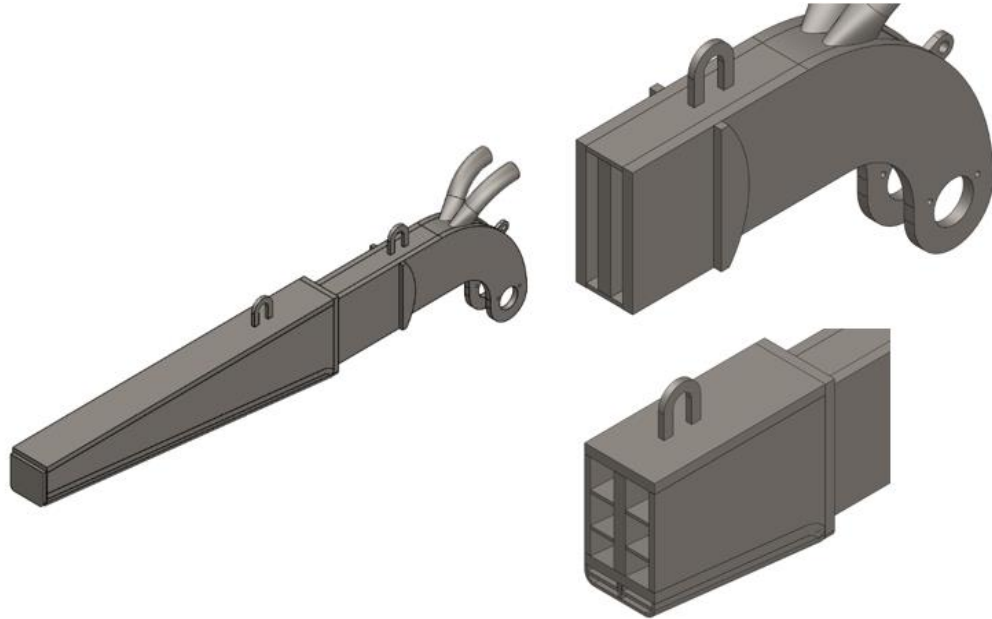
Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO OTIMIZADO

Para modelagem CAD 3D de todas as peças foi utilizado um software amplamente utilizado em diversas áreas, como a acadêmica e a industrial, o SolidWorks.

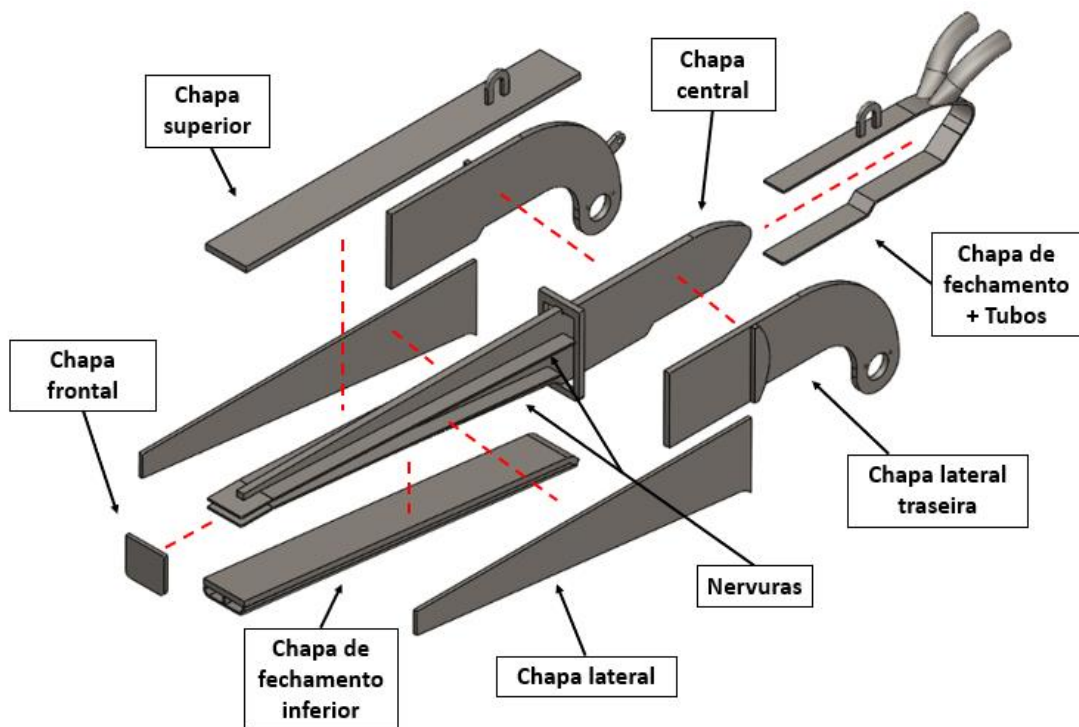
O modelo CAD 3D do projeto original, mostrado nas Figuras 7 e 8, foi disponibilizado pela empresa cliente, não tendo sido necessária sua modelagem, apenas a inserção dos cordões de solda tendo em vista a simulação estrutural (as definições de contatos entre superfícies têm grande influência no resultado), conforme mostrados na Figura 9 (destacados em amarelo).

Figura 7 – Desenho CAD 3D do projeto original



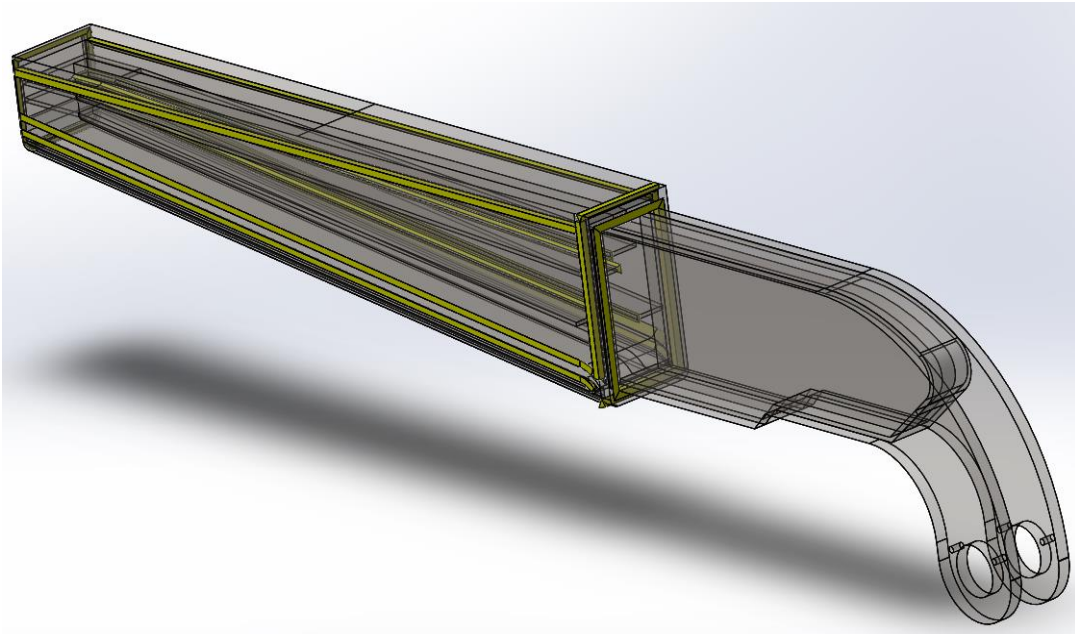
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 8 – Vista explodida do desenho CAD 3D do projeto original



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 9 – Desenho CAD 3D do projeto original com cordões de solda



Fonte: Autoria própria (2019).

O desenvolvimento e modelagem do projeto otimizado tiveram como base dois principais pontos. O primeiro, que a nova peça deve respeitar a geometria e as dimensões externas do projeto original, bem como manter inalteradas as conexões com outros elementos que fazem parte da montagem da peça (cilindro hidráulico, rótula etc.), de forma a garantir sua correta montagem no forno sem necessidade de alterações ou adaptações. O segundo e principal, a necessária diminuição da enorme deformação na extremidade da peça que tende ao centro do forno, que provoca trinca nas soldas, causando vazamentos de água, o que faz com que a peça tenha que ser substituída. Analisada as condições de operação da peça, foi identificado que tal deformação é causada pela combinação de dois fatores. O principal, a alta temperatura (1000°C ambiente, sem considerar a refrigeração do conjunto que diminui consideravelmente esta temperatura) à qual os elementos estão expostos, o que afeta diretamente a resistência mecânica do aço, diminuindo seu limite de escoamento consideravelmente – segundo a norma Eurocode 3 (Parte 1-2) de projetos de estruturas metálicas contra incêndio, o limite de escoamento de um aço carbono é reduzido aproximadamente pela metade quando sujeito a uma temperatura de 550°C, em comparação à mesma propriedade à 20°C. E o segundo fator, o alto valor da carga de sucata metálica despejada sobre os elementos.

Levando-se em considerações os pontos elencados acima, foram realizadas as seguintes alterações no projeto original:

i. A chapa central do conjunto e a chapa superior (dois principais componentes na sustentação da carga) foram mantidas com a mesma espessura (31,75 mm e 25,4 mm, respectivamente), porém o material de ambas foi alterado de um aço estrutural ASTM A36 para um aço SAE 4340, de elevada resistência mecânica e alta resistência à fadiga. Empregando-se um aço com limite de escoamento 88% maior do que o atual, espera-se aumentar a resistência mecânica do conjunto, amenizando o efeito da alta temperatura sobre esta. A Tabela 2 mostra uma comparação de algumas propriedades mecânicas e térmicas desses dois aços.

Tabela 2 – Comparação das propriedades mecânicas e térmicas dos aços ASTM A36 e SAE 4340 à temperatura de 20°C

	<b>ASTM A36</b>	<b>SAE 4340</b>
<b>Limite de escoamento</b>	250 MPa	470 MPa
<b>Limite de ruptura à tração</b>	400 – 550 MPa	745 MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	200 GPa	190 – 210 GPa
<b>Dureza</b>	140 HB	217 HB
<b>Condutividade térmica</b>	50 W/m.K	44,5 W/m.K
<b>Coefficiente de expansão térmica</b>	11 $\mu\text{m/m.K}$	12,3 $\mu\text{m/m.K}$
<b>Calor específico</b>	470 J/kg.K	470 J/kg.K

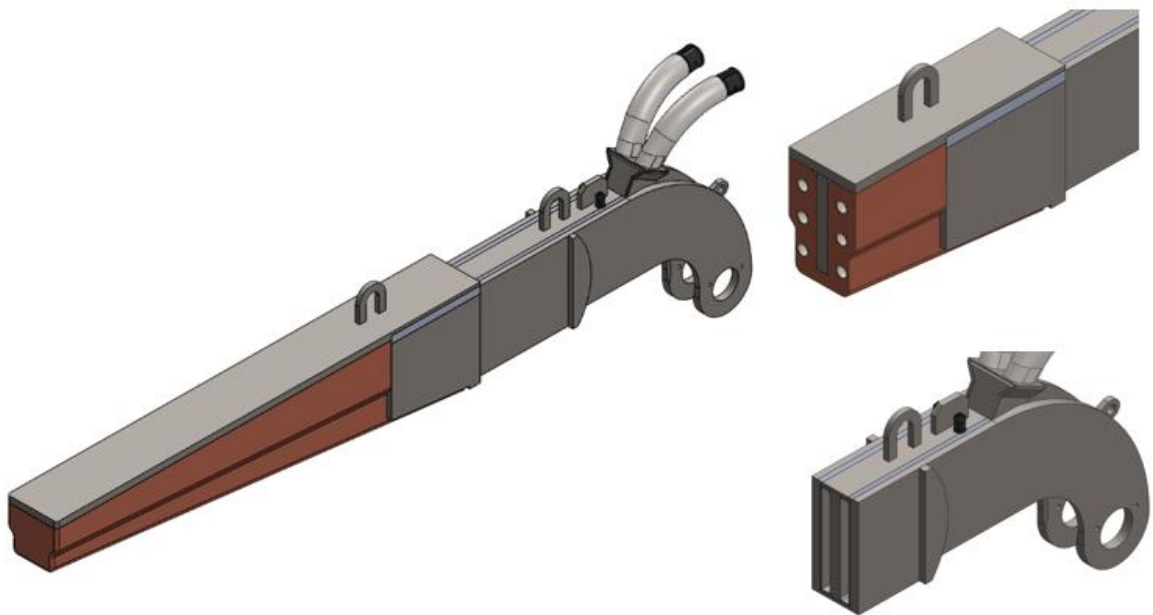
Fonte: Autoria própria (2019). Adaptado de matweb.com

ii. Para a aumentar a capacidade térmica do conjunto, ou seja, sua capacidade de operar em altas temperaturas, as chapas de aço da parte frontal (chapa de fechamento inferior, chapas laterais, nervuras e chapa frontal), com exceção da chapa central e da chapa superior (as quais foram mantidas devido sua importância vital para o comportamento estrutural do conjunto), foram substituídas por um corpo de cobre fundido (conforme a norma DIN EN 1982 Gr. B, liga de 99%Cu-C de alta condutividade térmica, largamente utilizada em peças para fornos industriais sujeitas à altas temperaturas e ambientes agressivos, como ventaneiras e placas de refrigeração usadas em altos fornos) com três serpentinas (tubo Ø1” Sch 40) de Monel 400 (conforme a norma UNS N04400, liga 67% Ni e 23% Cu, que tem ótimo caldeamento com o cobre, ou seja, adere muito bem a este, evitando o surgimento de cavidades de ar entre as interfaces dos dois materiais, o que funcionaria como um isolante térmico e diminuiria a transferência do calor para a água) no seu interior para escoamento da água de refrigeração, conforme mostrado na Figura 10. O cobre, por ter uma condutividade térmica muito superior

à do aço – 340 W/m.K e 50 W/m.K, respectivamente (à 20°C) – conduz muito melhor o calor, aumentando assim a transferência deste para a água de refrigeração. Com isso espera-se melhorar a refrigeração do conjunto, principalmente da chapa central, principal responsável por suportar a carga de sucata despejada, fazendo com que a resistência mecânica do aço seja menos afetada pelo calor do forno. Essa alteração também inibe o aparecimento de trincas, já que se trata de um corpo sólido fundido, e não de chapas soldadas.

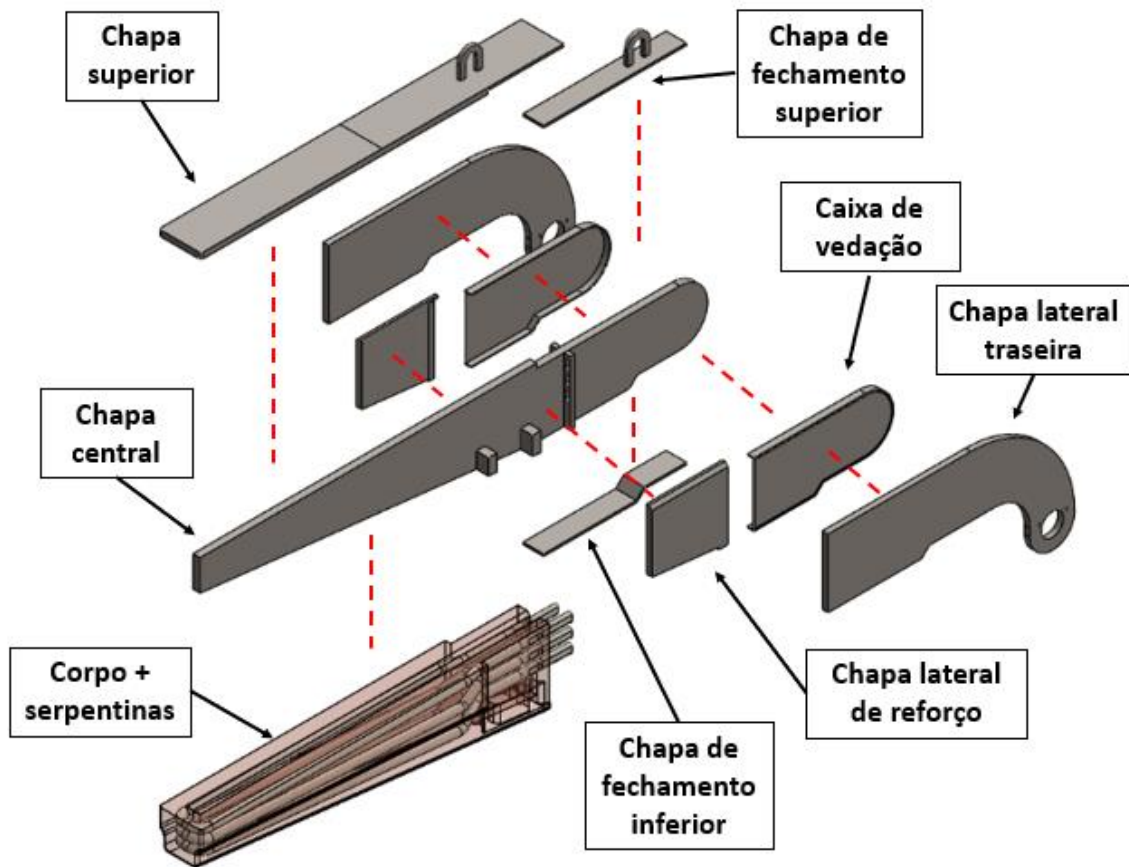
A peça otimizada é mostrada nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Desenho CAD 3D do projeto otimizado



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 11 – Vista explodida do desenho CAD 3D do projeto otimizado



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.3 SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS ESTÁTICAS

Para as simulações do comportamento estrutural estática dos conjuntos e do escoamento dos fluidos dos sistemas de refrigeração (CFD) foi utilizado o software de simulação computacional baseada no método de elementos finitos ANSYS (versão 19.2). Tendo sido empregados dois de seus módulos, o Static Structural, para simulações estruturais estáticas e o Fluid Flow (CFX), para simulações fluidodinâmicas (CFD).

Foram feitas algumas simplificações do problema para as simulações estruturais de ambos os casos, tanto do projeto original quanto do otimizado:

- i. A carga de sucata metálica foi considerada estática, ao invés de dinâmica.
- ii. A temperatura na região de operação do sistema pré-aquecedor (1000°C) foi desprezada, tendo sido considerada uma temperatura ambiente de 20°C.

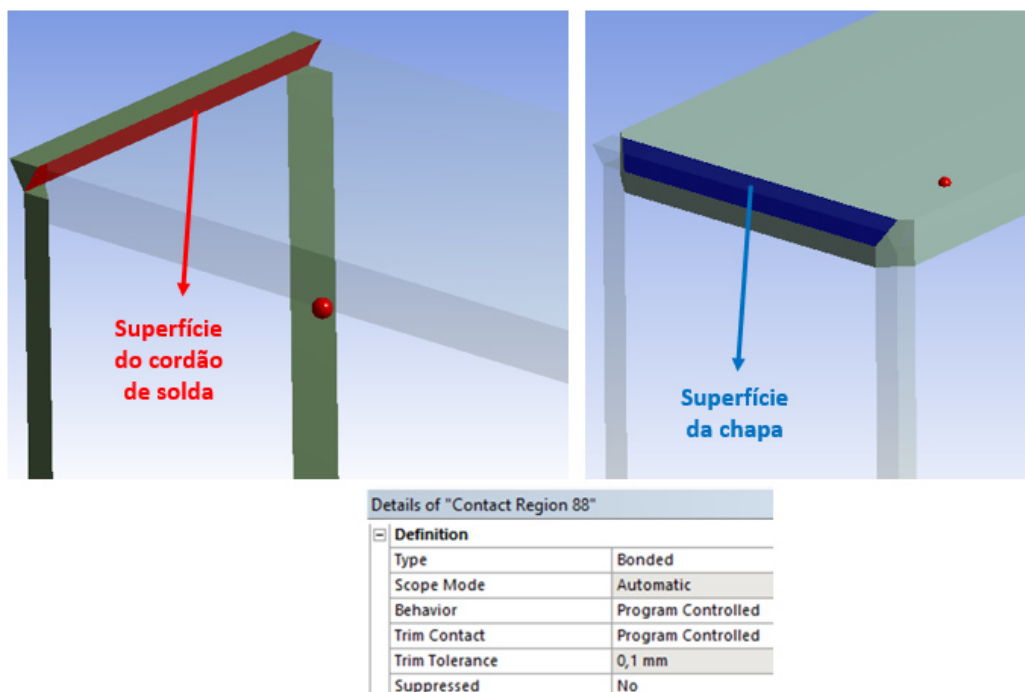
Como o objetivo do trabalho é de otimizar o projeto original, comparando os resultados de suas simulações as do projeto modificado, as simplificações, tendo sido aplicadas à ambos

os casos, foram consideradas adequadas.

Para iniciar a simulação do projeto original no ANSYS *Workbench* foi selecionado o módulo *Static Structural*. Não foi necessário incluir ou selecionar nenhum material na seção *Engineering Data* já que a peça original é toda fabricada em aço estrutural, material padrão desse módulo. Em seguida foi selecionada a geometria (modelo CAD 3D) e depois aberta a opção *Model*, ambiente do software no qual foi feita a edição da malha, dos contatos entre superfícies e colocadas as condições de contorno, conforme descrito detalhadamente a seguir.

Edição dos contatos entre superfícies: para se aproximar o máximo possível da condição real, na qual as chapas do conjunto são todas unidas por cordões de solda, foram inseridos dois tipos de contato no modelo. Em todas as superfícies de contato entre cordões de solda e chapas foram colocados contatos do tipo *Bonded*, conforme mostrado na Figura 12, que impedem movimentos de deslizamento e separação entre as superfícies, representando assim uma solda. E nos contatos entre superfícies de chapas foram colocados contatos do tipo *Frictionless*, os quais permitem que haja deslizamento tangencial entre as superfícies, permitindo a formação de lacunas.

Figura 12 – Configuração de contato do tipo *bonded* no ANSYS

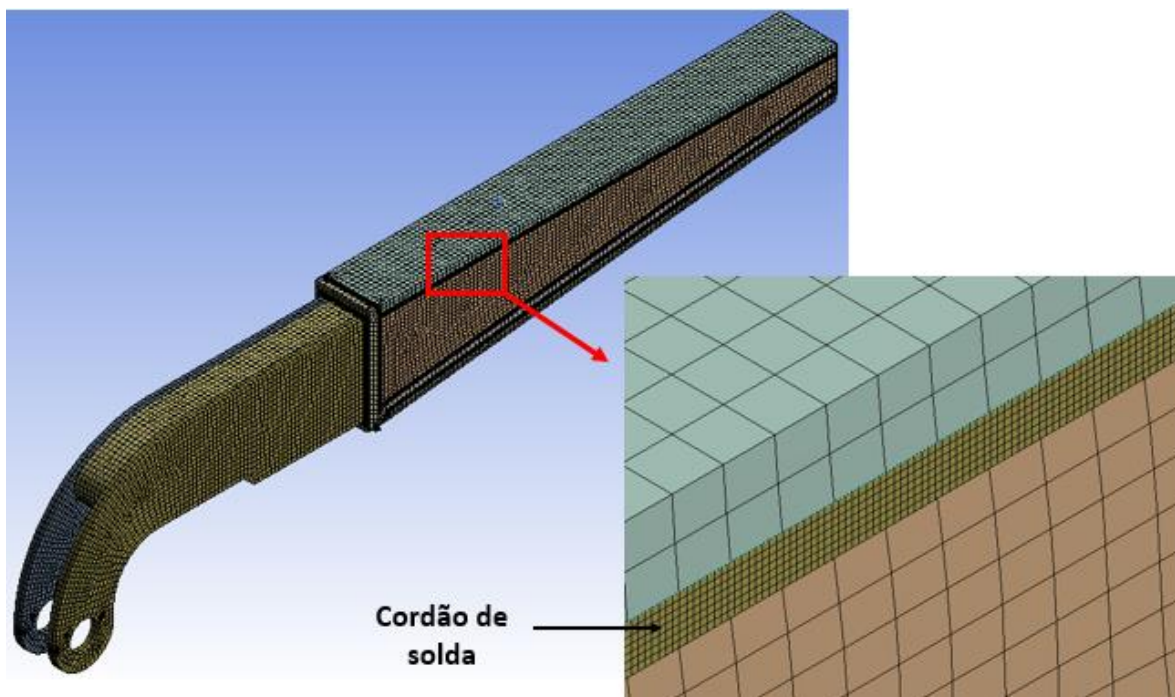


Fonte: Autoria própria (2019).

Edição da malha: como todas as peças que compõem o projeto original se tratam de geometrias simples (chapas planas e cordões de solda triangulares), foram utilizados apenas

elementos hexaédricos na malha, por se adaptarem melhor à geometrias simples do que outros tipos de elementos, para isso foi utilizado o método *Hex Dominant Method* em todas os corpos. O tamanho geral dos elementos escolhido foi de 15 mm – por se adequarem bem às espessuras das chapas –, com exceção dos cordões de solda, cujo tamanho escolhido foi de 2 mm (utilizando-se a opção *Body Sizing*), por se tratarem de geometrias menores e a fim de refinar mais a malha nessas regiões, devido sua importância para a análise dos resultados das tensões (soldas são potenciais concentradoras de tensão). Na Figura 13 é possível visualizar os elementos de malha hexaédricos e a diferença de tamanho dos elementos das chapas e dos cordões de solda. O total de elementos foi de 286921 e o total de nós foi de 1430807.

Figura 13 – Detalhes da malha para simulação estrutural do projeto original

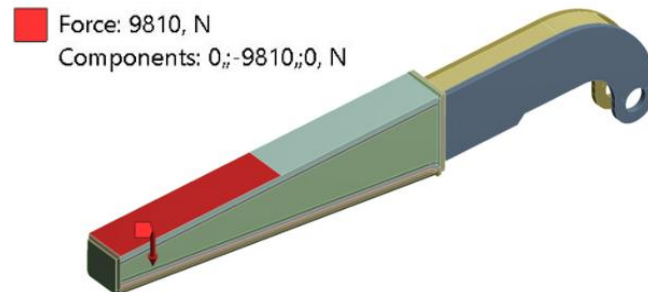


Fonte: A autoria própria (2019).

Condições de contorno: foram colocadas seguindo a análise preliminar feita na Seção 3.1. Primeiramente, conforme mostrado na Figura 14, foi adicionada uma carga estática (*Force*) de 9810 N na metade superior do elemento, no sentido negativo do eixo y, simbolizando a carga metálica de sucata. Em seguida foi adicionado uma restrição de movimento (*Displacement*) nos eixos y e x na região de apoio na carcaça, deixando livre o movimento no eixo z nesse apoio, conforme mostrado na Figura 15. E, por último, foi colocado um contato cilíndrico (*Cylindrical Support*) com restrições de movimento radial, axial e tangencial nos furos de conexão com o cilindro hidráulico, representando a condição

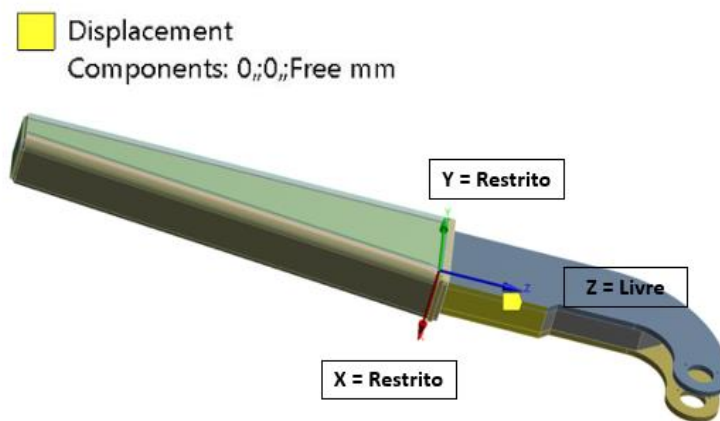
real, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 14 – Condição de contorno *Force*



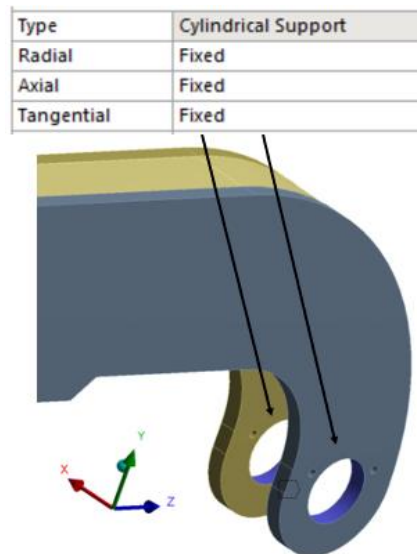
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 15 – Condição de contorno *Displacement*



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 16 – Condição de contorno *Cylindrical Support*



Fonte: Autoria própria (2019).

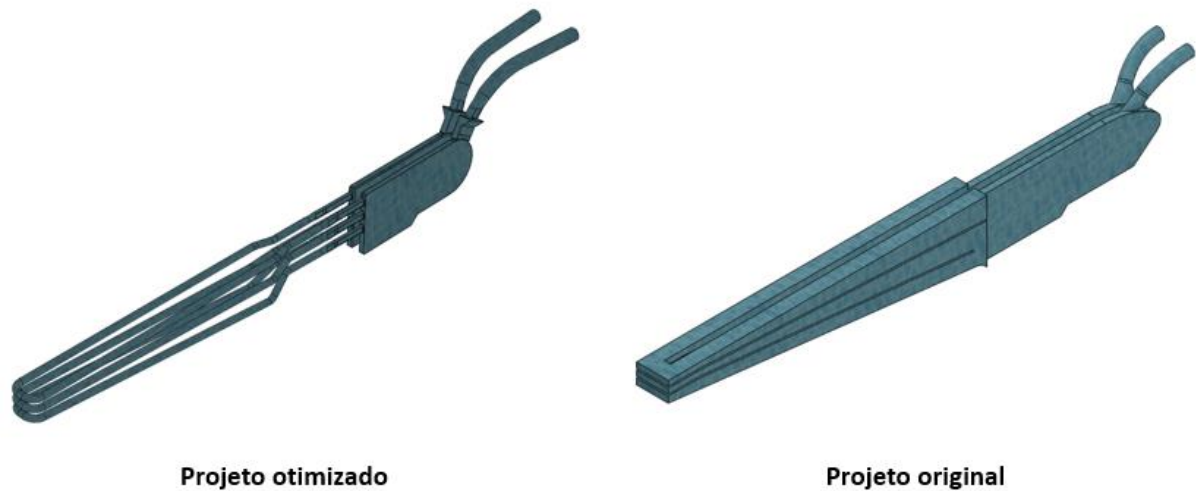
Para a simulação estrutural do projeto otimizado foram feitos os mesmos passos descritos na seção 3.3 para o projeto original. A única modificação foi no tipo de elemento de malha usado no corpo de cobre fundido, o tetraédrico. Por esse corpo ter muitas cavidades internas e curvaturas, esse tipo de elemento se adapta melhor à geometria. Também para esse corpo foi usado um tamanho de elemento igual a 15 mm. Todo o restante – condições de contorno, contatos entre superfícies, tipo e tamanho de elementos de malha das chapas e cordões de solda – foi feito exatamente igual à configuração da simulação do projeto original. O total de elementos foi de 215801e o total de nós foi de 749246.

Feitas a edição e configuração das malhas e das condições de contorno, as simulações foram processadas e os resultados são apresentados na seção 4 deste trabalho.

### 3.4 SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS (CFD)

Primeiramente, utilizando o Solidworks, foram feitos os modelos CAD 3D do circuito interno que a água de refrigeração percorre nos dois projetos, o original e o otimizado, conforme mostrados na Figura 17. Sendo essas as geometrias utilizadas nas simulações fluidodinâmicas (CFD) a fim de se avaliar cada sistema de refrigeração.

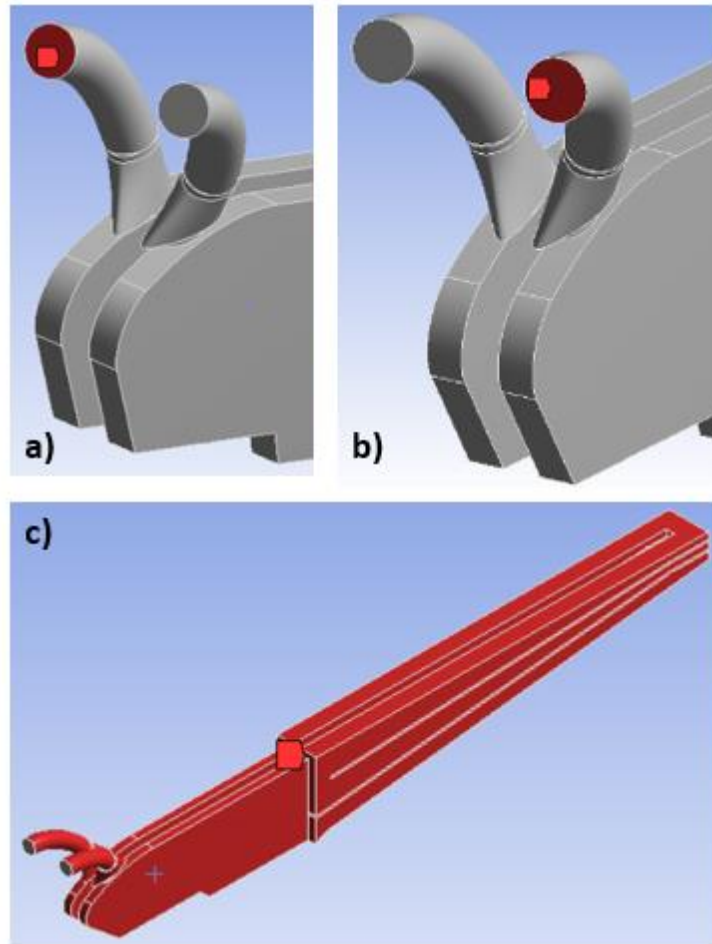
Figura 17 – Modelos CAD 3D do circuito interno de escoamento da água



Fonte: A autoria própria (2019).

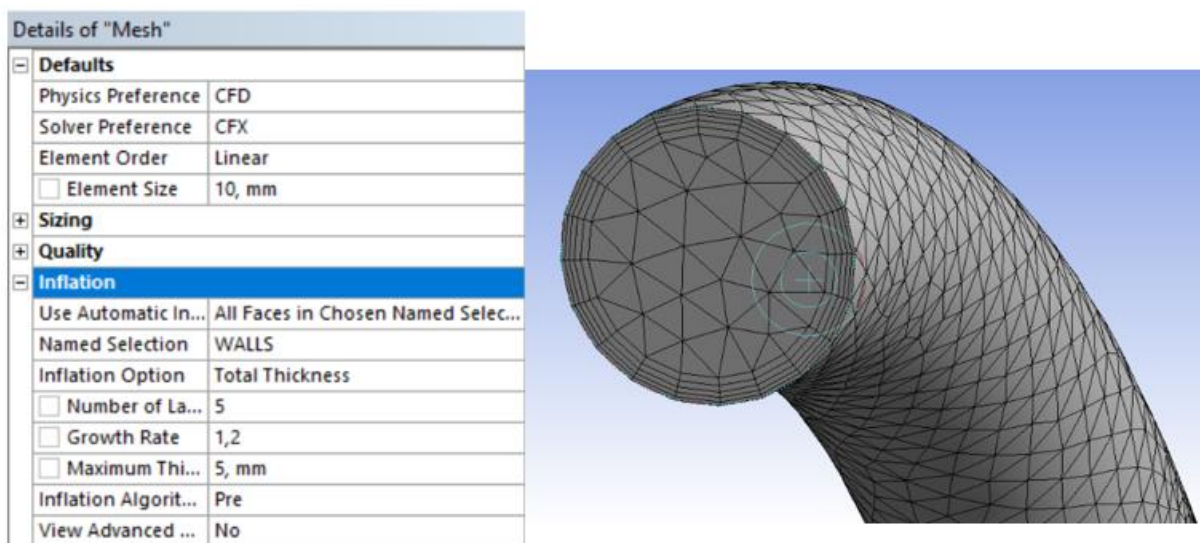
Para a simulação CFD do projeto original foi selecionado o módulo *Fluid Flow* (CFX) do ANSYS *Workbench* e inserida a geometria CAD na opção *Geometry*. Aberta a opção *Mesh* para edição da malha, foram criados três *Named Selections*: *INLET* na superfície de entrada da água, *OUTLET* na superfície de saída e *WALLS* em todas as superfícies (paredes) nas quais a água escoava, conforme mostrado na Figura 18. Em seguida foi definido um tamanho máximo de 10 mm para os elementos da malha, além de colocada a opção *Inflation* (opção ‘*total thickness*’) nas paredes (*WALLS*) do escoamento com 5 camadas com taxa de crescimento 1,2 (*growth rate*) e espessura máxima de 5 mm, a fim de se representar a camada limite e o perfil de velocidade das partículas do fluido, conforme mostrado na Figura 19. O total de elementos foi de 753095 e o total de nós foi de 288129.

Figura 18 – *Named Selections*: (a) *INLET*; (b) *OUTLET*; (c) *WALLS*



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 19 – Detalhe da malha para CFD com *Inflation* nas paredes



Fonte: Autoria própria (2019).

Terminada a edição da malha, foi aberta a opção *Setup* do módulo *Fluid Flow* (CFX) para se editar as condições de contorno, propriedades do fluido e característica do escoamento, previamente analisadas na seção 3.1. Primeiramente foram definidos os domínios de entrada (*INLET*), saída (*OUTLET*) e paredes (*WALLS*) do escoamento. Em *Analysis Type* foi definido o tipo de regime de escoamento como permanente (*steady state*). Para o domínio da parede (*WALLS*), na guia *Fluid Models*, o *Heat Transfer* foi definido como *Total Energy*, para posterior avaliação do coeficiente de transferência de calor nos resultados, e o material (em *Basic Settings*) selecionado foi a água. Para o domínio de entrada (*INLET*), em *Boundary Details*, foi definido uma pressão relativa de 8 bar e foi colocada uma temperatura qualquer acima ( $44^{\circ}\text{C}$ ) da ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), apenas para se obter o coeficiente de transferência de calor. E no domínio da saída, em *Boundary Details*, foi colocada uma vazão mássica de 2,77 kg/s. Terminada a edição das condições, propriedades e características do escoamento, a simulação foi processada e os resultados são apresentados na seção 4 deste trabalho.

Para a simulação do sistema de refrigeração do projeto otimizado foram feitos exatamente os mesmos passos da simulação do projeto original. Sendo a única diferença que o tamanho dos elementos da malha do projeto modificado não foi limitado, pois a qualidade padrão gerada pelo programa foi considerada de boa qualidade e adequada, a partir do critério *Element Quality*, do ANSYS. As edições da opção *Inflation* também mantidas. O total de elementos foi de 1262385 e o total de nós foi de 525587.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

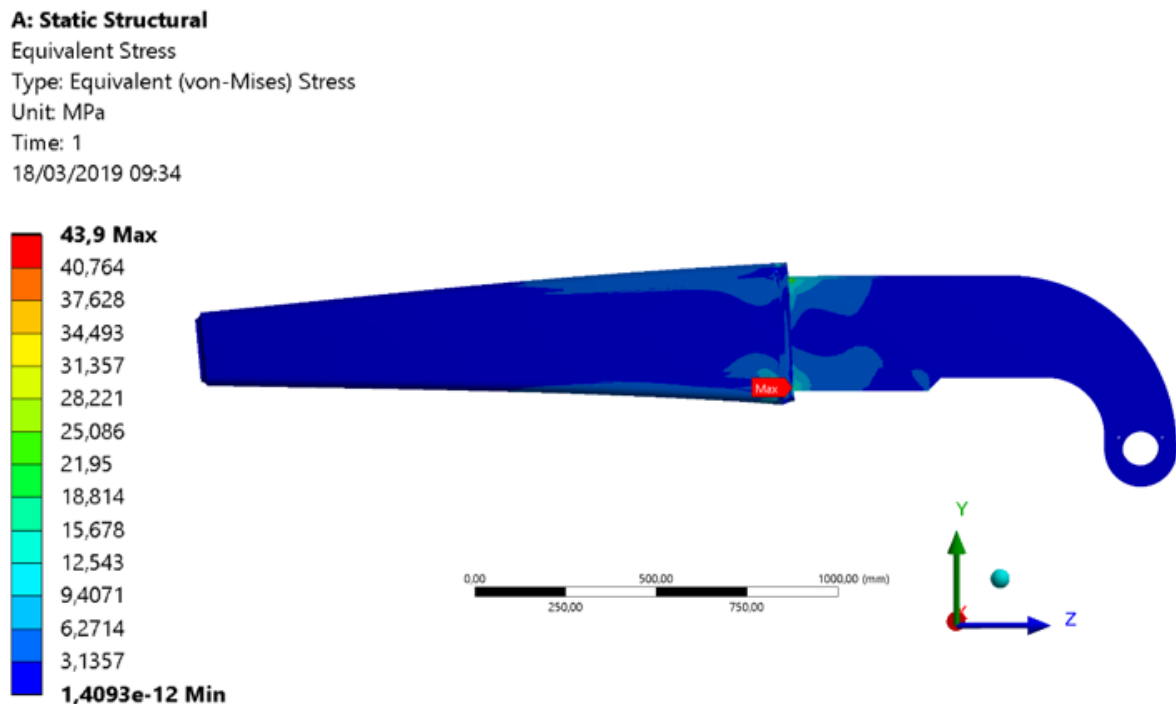
Processadas as simulações computacionais, os resultados obtidos são apresentados a seguir.

### 4.1 SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS ESTÁTICAS

Como critérios de avaliação das simulações estruturais estáticas foram usados a tensão equivalente de Von Mises (teoria da máxima energia de distorção) e o deslocamento.

A Figura 20 mostra os resultados da tensão equivalente de Von Mises do projeto original, bem como o ponto onde ela é máxima, que é justamente sobre a região de apoio na carcaça e de união soldada, e seu valor de 43,9 MPa, muito abaixo do limite de escoamento do aço SAE 4340, de 470 MPa, e do aço ASTM A36, de 250 MPa.

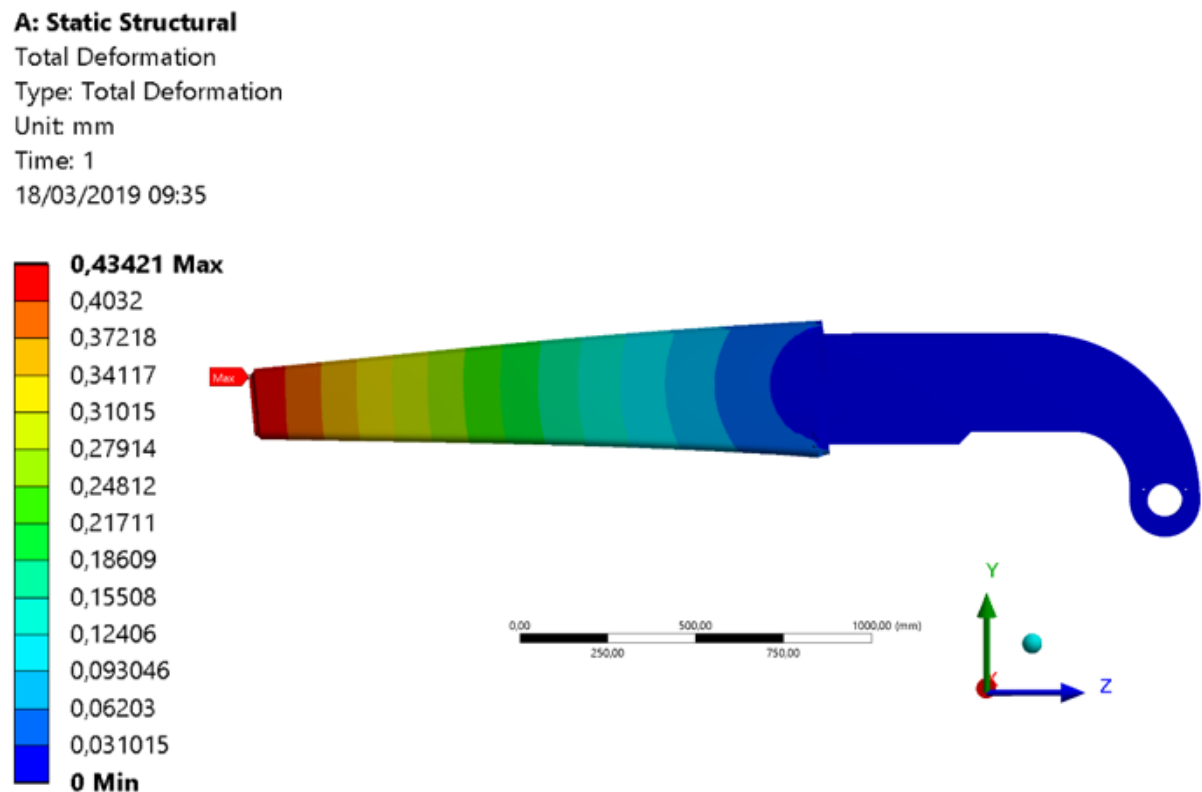
Figura 20 – Resultado da tensão equivalente de Von Mises do projeto original



Fonte: Aatoria própria (2019).

A Figura 21 mostra o resultado do deslocamento total do projeto original, bem como seu ponto máximo – na extremidade da peça que fica dentro do forno – e seu respectivo valor de 0,4342 mm.

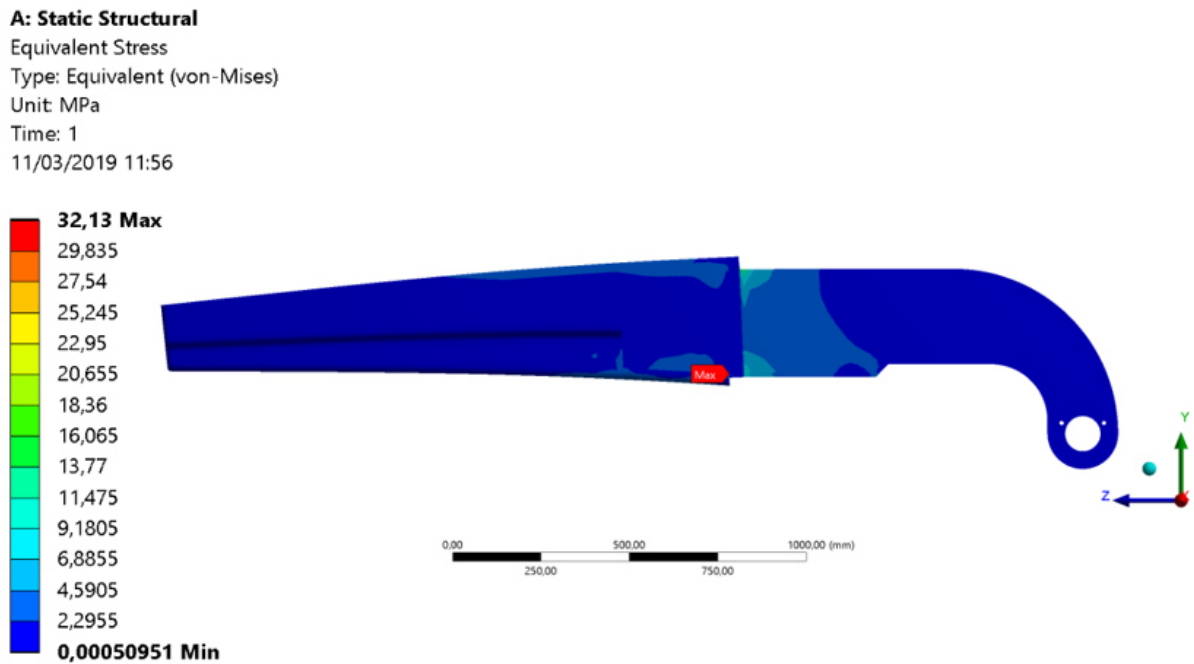
Figura 21 – Resultado do deslocamento do projeto original



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 22 mostra os resultados da tensão equivalente de Von Mises do projeto modificado, bem como o ponto onde ela é máxima, que assim como no resultado do projeto original, é sobre a região de apoio na carcaça e de união soldada, e seu valor de 32,13 MPa, muito abaixo do limite de escoamento do aço SAE 4340, de 470 MPa, e do aço ASTM A36, de 250 MPa.

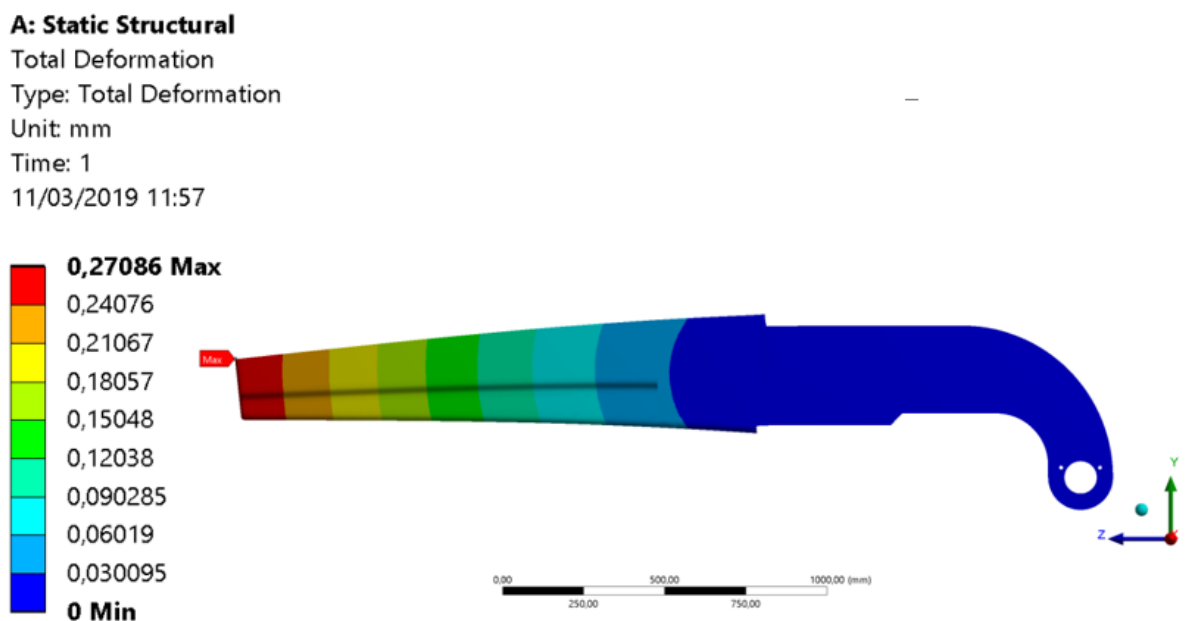
Figura 22 – Resultado da tensão equivalente de Von Mises do projeto modificado



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 23 mostra o resultado do deslocamento total do projeto modificado, bem como o seu ponto máximo – na extremidade da peça que fica dentro do forno - e seu respectivo valor de 0,2709 mm.

Figura 23 – Resultado do deslocamento do projeto modificado



Fonte: Autoria própria (2019).

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os resultados das simulações estruturais estáticas de ambos projetos, original e modificado, da qual pode-se avaliar que:

- i. Em ambos os projetos a tensão equivalente de Von Mises máxima ficou consideravelmente abaixo da tensão de escoamento do aço SAE 4340 (470 MPa) e do aço ASTM A36 (250 MPa) – os dois tipos de aço usados nos projetos –, e que, portanto, ambas atendem ao critério de falha de Von Mises.
- ii. A tensão equivalente de Von Mises máxima do projeto modificado é 36,6% menor do que a do projeto original.
- iii. E o deslocamento máximo do projeto modificado é 60,3% menor do que a do projeto original.

Apesar de ambas as tensões equivalentes de Von Mises máximas estarem consideravelmente abaixo do limite de escoamento dos aços utilizados, deve-se ter em consideração que as simplificações adotadas (consideração da carga estática, ao invés de dinâmica, o que certamente incorreria numa energia potencial elevada de impacto, e o desprezo dos efeitos da alta temperatura a qual os elementos são expostos, o que diminuiria consideravelmente a resistência mecânica dos aços) diminuem a exigência mecânica e térmica da peça e não expressam a condição real de operação, na qual certamente a tensão e o deslocamento serão maiores. Daí a importância do aumento da resistência mecânica do conjunto, que será o diferencial quando aplicadas as condições reais de operação.

Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações estruturais

	<b>Tensão equivalente de Von Mises máxima</b>	<b>Deslocamento máximo</b>
	MPa	mm
<b>Projeto original</b>	43,90	0,4342
<b>Projeto modificado</b>	32,13	0,2709
Diferença	36,6%	60,3%

Fonte: Autoria própria (2019)

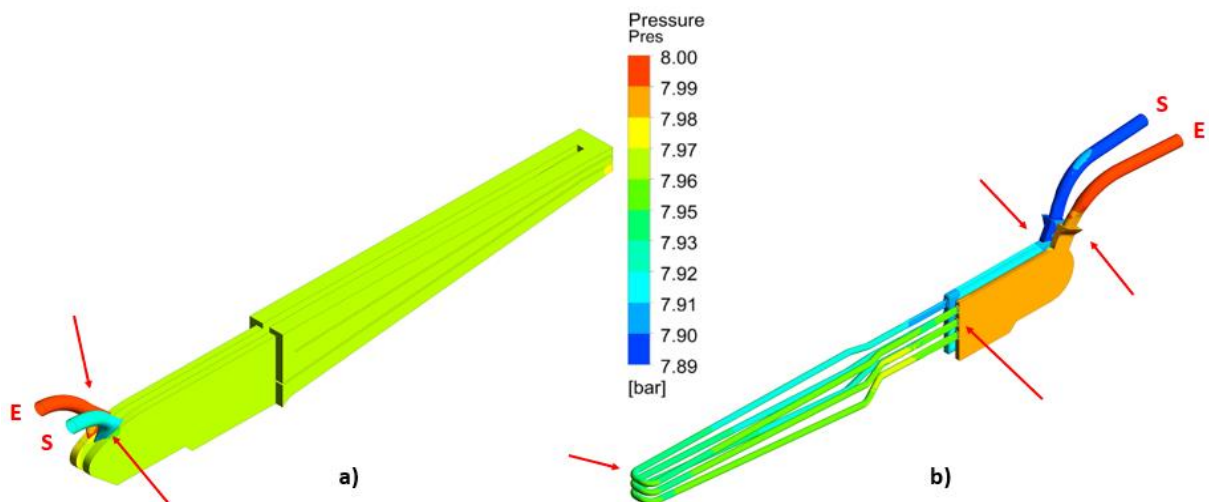
#### 4.2 SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS (CFD)

Como parâmetros para avaliação da capacidade de refrigeração dos sistemas de ambos os projetos foram utilizados a diferença de pressão entre a entrada e saída do escoamento (perda de carga), a velocidade do fluido, o coeficiente de transferência de calor convectivo

nas paredes e o calor retirado pelo fluido (aproximado).

A Figura 24 mostra uma comparação dos resultados da pressão em cada ponto ao longo do escoamento de ambos os projetos. A pressão na entrada do escoamento do projeto original é de 8,00 bar (máxima) e na saída 7,93 bar (mínima), o que equivale a uma perda de carga de 0,07 bar. No projeto otimizado a pressão de entrada é de 8,00 bar (máxima) e na saída 7,91 bar (mínima), o que equivale a uma perda de carga de 0,09 bar, 25% maior do que a perda de carga do projeto original. Além disso, pode-se analisar os principais pontos de perda de carga em ambos os projetos. No original temos dois pontos principais, um na saída do tubo de entrada da água e outro na entrada do tubo de saída, conforme indicado pelas setas vermelhas. No projeto modificado temos quatro principais pontos de perda de carga. No sentido do escoamento, o primeiro ponto na conexão do tubo de entrada da água com a estrutura de aço, o segundo na transição da refrigeração por câmara (da estrutura de aço) para serpentinas (cobre), o terceiro após as duas curvas de 90° na extremidade do escoamento, e o quarto na conexão entre a estrutura de aço e o tubo de saída da água.

Figura 24 – Resultado da pressão da água dos projetos original (a) e modificado (b)

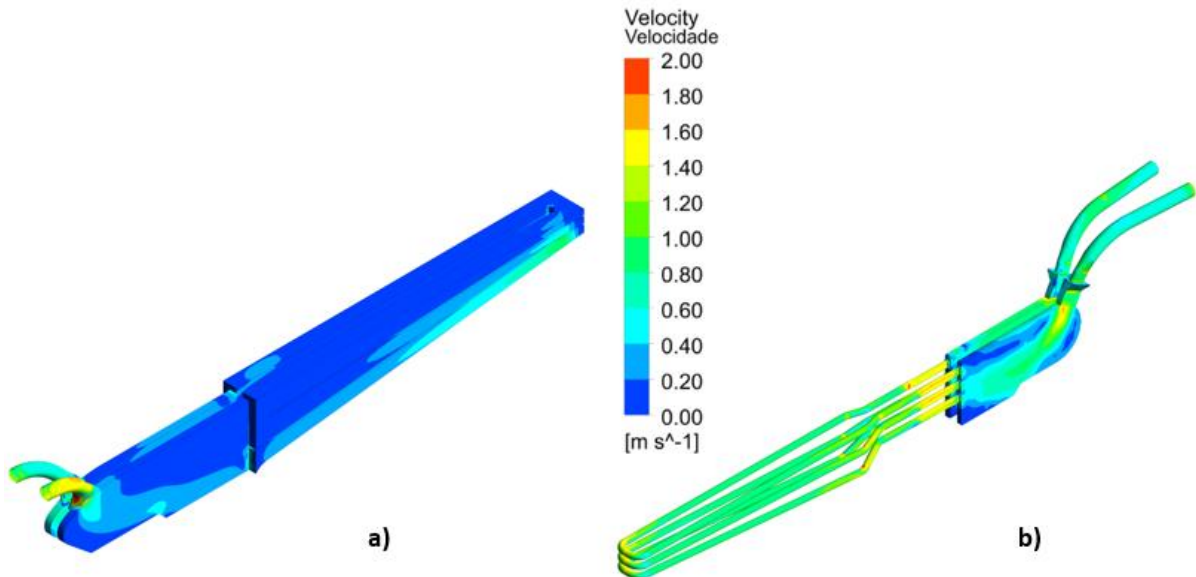


Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 25 mostra os resultados da velocidade da água de refrigeração em cada ponto dos escoamentos de ambos os projetos. Na qual pode-se perceber que a velocidade do escoamento do projeto otimizado é consideravelmente maior do que a do projeto original, o que é confirmado pelo valor da velocidade média de cada escoamento obtido pela calculadora do ANSYS: 0,27 m/s do projeto original e 0,80 m/s do projeto otimizado (296% maior do que o original). Tal aumento da velocidade no projeto otimizado pode ser explicado pela redução

da área do escoamento ao serem inseridas as serpentinas fundidas com o cobre, sendo a área inversamente proporcional à velocidade ( $V = Q/A$ ).

Figura 25 – Resultado da velocidade da água dos projetos original (a) e modificado (b)



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 26 mostra os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção nas paredes dos escoamentos dos projetos original e otimizado. Na qual verifica-se um aumento de tal coeficiente no projeto otimizado, principalmente na região de maior interesse (interior do forno), o que é confirmado pelos coeficientes médios obtidos utilizando-se a calculadora do ANSYS: 2510,27 W/m<sup>2</sup>.K o do projeto original e 6198,61 W/m<sup>2</sup>.K o do projeto otimizado, 147% maior.

A partir da lei do resfriamento de Newton (Equação 1), segundo a qual a transferência de calor por convecção é produto do coeficiente convectivo ( $h$ ), da área da superfície pela qual o calor é transferido ( $A$ ) e do gradiente de temperatura  $\Delta T$  entre o corpo e o ambiente, calculou-se a capacidade do escoamento em retirar calor da peça, ou seja, sua capacidade de refrigeração. Fixando um  $\Delta T = 1000 - 35 = 965^\circ\text{C}$  para ambos os projetos (apenas para fins de comparação), e utilizando os valores da área do escoamento medidos no modelo CAD, o calor retirado pelo escoamento no projeto original é de 8,40 MW e de 10,89 MW no projeto otimizado. Portanto, o novo projeto tem uma capacidade de refrigeração 30% maior do que a do projeto original.

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (1)$$

Também, ao observar-se as Figuras 25 e 26, é explícita a semelhança dos resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção nas paredes com os resultados da velocidade, em ambos os projetos. Tal semelhança é explicada pelo fato da velocidade ser diretamente proporcional ao número de Reynolds, que por sua vez é diretamente proporcional ao número de Nusselt, o qual é diretamente proporcional ao coeficiente convectivo (h), conforme mostrado nas Equações 2, 3 (equação de Dittus-Boelter para escoamento interno turbulento plenamente desenvolvido) e 4

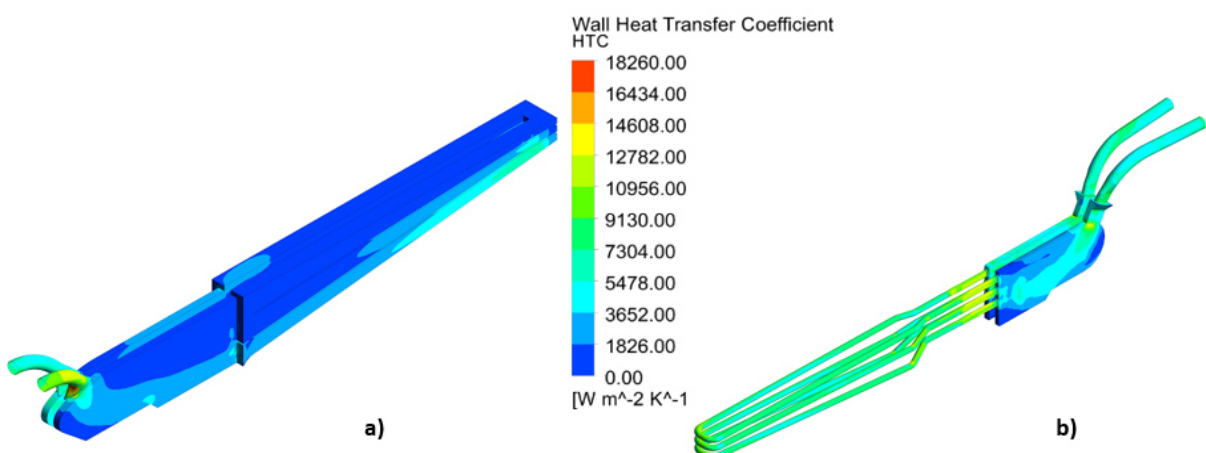
$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (2)$$

$$Nu_D = 0,023 \times Re^{4/5} \times Pr^{0,4} \quad (3)$$

$$h = \frac{k \times Nu}{D_h} \quad (4)$$

Onde Re é o número de Reynolds (adimensional),  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ), V é a velocidade (m/s), D é o diâmetro hidráulico (m),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $\text{N.s/m}^2$ ), Nu é o número de Nusselt (adimensional), Pr é o número de Prandtl (adimensional), k é a condutividade térmica ( $\text{W/m.K}$ ) e h é o coeficiente de transferência térmica por convecção ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ )

Figura 26 – Resultado do coeficiente de transferência térmica por convecção do escoamento dos projetos original (a) e modificado (b)



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 4 é feita uma compilação dos valores médios das velocidades e dos coeficientes de transferência de calor dos escoamentos, da capacidade de refrigeração, bem como da perda de carga entre a entrada e a saída em ambos os projetos.

Tabela 4 – Comparação dos resultados das simulações fluidodinâmicas

	<b>Perda de Carga</b>	<b>Velocidade média</b>	<b>Coefficiente de transferência de calor médio</b>	<b>Capacidade de refrigeração</b>
	bar	m/s	W/m <sup>2</sup> .K	MW
<b>Projeto original</b>	0,07	0,27	2510,27	8,40
<b>Projeto modificado</b>	0,09	0,80	6198,61	10,89
Diferença	28,6%	196,3%	146,9%	29,6%

Fonte: Autoria própria (2019)

### 4.3 AVALIAÇÃO FINAL

Considerando o aumento significativo da resistência mecânica do projeto otimizado – avaliado pela diminuição do deslocamento da extremidade que tendo ao centro do forno em 60,3% e pela diminuição da tensão equivalente de Von Mises máxima em 36,6% – bem como o aumento da capacidade de refrigeração deste – avaliada pelo aumento da quantidade de calor retirada em 30% - conclui-se que a vida útil do projeto otimizado tende a ser maior do que a do projeto original.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÃO

Baseado na geometria do projeto original, nas informações e dados de operação da peça, bem como no histórico de falhas apresentado, o novo projeto otimizado foi desenvolvido a fim de se aumentar a vida útil do conjunto. Considerando o alto valor da carga de sucata metálica que é despejada sobre os elementos e a alta temperatura a qual estão expostos, as modificações feitas tiveram o objetivo de aumentar a resistência mecânica e melhorar a refrigeração dos elementos, a fim de se amenizar o efeito da alta temperatura sobre as propriedades mecânicas dos materiais metálicos utilizados.

Realizadas as simulações computacionais no programa ANSYS (baseado no método de elementos finitos) do comportamento estrutural estático e do escoamento da água de refrigeração (CFD) de ambos os projetos (original e otimizado), os resultados mostraram uma considerável melhora na resistência mecânica (avaliada pela diminuição do deslocamento na extremidade que tende ao centro do forno e pela diminuição da tensão equivalente de von Mises) e na refrigeração (avaliada principalmente pelo aumento da capacidade do escoamento de retirar calor) do projeto otimizado. Resultados que indicam que o projeto otimizado quando em operação terá uma vida útil maior do que a do projeto original.

### 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como neste trabalho foram adotadas algumas simplificações para a simulação estrutural de ambos os projetos, recomenda-se para trabalhos futuros considerar os fatores desprezados: a alta temperatura ambiente ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) a qual os elementos estão expostos e a carga como dinâmica. Sugere-se utilizar os coeficientes médios de transferência de calor por convecção obtidos nas simulações fluidodinâmicas (CFD) numa simulação térmica e, em seguida, processar uma simulação de estrutural de impacto sobre a térmica, utilizando os resultados desta.

Também se recomenda realizar um estudo de falha por fadiga, o qual não foi feito neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AZO MATERIALS. **AISI 4340 alloy steel (UNS G43400)**. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772>. Acesso em: 12 out. 2019.

BEER, Ferdinand P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011.

BITTENCOURT, Marco Lúcio. **Análise computacional de estruturas**: com aplicação do método de elementos finitos. Campinas: Unicamp, 2010. 294 p.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D.. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. 509 p.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. **BS EN 1982 copper and copper alloy ingots and castings**: compositions, properties, processes and uses. 2008. Disponível em: <https://copperalliance.org.uk/knowledge-base/resource-library/bs-en-1982-copper-alloy-ingots-castings/>. Acesso em: 11 out. 2019.

GGD METALS. **GGD 4340**. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-4340.pdf>. Acesso em: 26 set. 2019.

INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LOTTI, Raquel S. *et al.* Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p.35-43, mar. 2006.

MAKE IT FROM. **ASTM A36 (SS400, S275) structural carbon steel**. Disponível em: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-A36-SS400-S275-Structural-Carbon-Steel>. Acesso em: 10 out. 2019.

MILKE, James; KODUR, Venkatesh; MARRION, Christopher. A overview of fire protection in buildings. *In*: ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Federal Emergency Management Agency. **World Trade Center building performance study**: data collection, preliminary observations, and recommendations. New York, 2002. p. 1-28.

MINITECNOLOGIAS LTDA. **EOF - Energy Optimizing Furnace**: perfil de equipamento. Disponível em: [http://www.minitecnologias.com.br/eof-pt\\_16-07-09.pdf](http://www.minitecnologias.com.br/eof-pt_16-07-09.pdf). Acesso em: 22 fev. 2019.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método de elementos finitos**: o que é? 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 21 nov. 2019.

SHARMA, Vijay. **Optimization of steel making process through energy optimizing furnace under indian conditions**. 2008. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Anna University, Chennai, 2008. Disponível em: <https://sg.inflibnet.ac.in/handle/10603/27769>. Acesso em: 26 nov. 2019.

SPECIAL METALS. **Monel alloy 400**. 2005. Disponível em:  
<https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/monel/monel-alloy-400.pdf>.  
Acesso em: 09 out. 2019.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011