

APLICAÇÃO DE MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

Um estudo de caso na Prática Klimaquip

Matheus Costa Pereira^a, Gustavo Henrique Judice^b, Pedro José Papandréa^{c*}

^a Universidade Federal de Itajubá, UNIFEL, Itajubá - MG

^b Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Alfenas - MG

^c Centro Universitário UNA (UNA), Pouso Alegre - MG

RESUMO

Com o objetivo de desenvolver uma base para uma unidade condensadora de refrigeração, foram realizadas análises e simulações para reduzir os valores de deslocamento total e da tensão de von-Mises. O estudo foi realizado considerando uma base de apoio para um equipamento do tipo espiral de congelamento utilizado pela empresa Prática Klimaquip. Foi feita uma breve apresentação da parte matemática do Método de Elementos Finitos e uma análise utilizando o software Ansys Engineering Simulation. Em seguida, os resultados foram analisados no pós-processamento. As simulações estruturais foram conduzidas e o objetivo inicial de otimizar a base foi alcançado ao longo do trabalho. Foram desenvolvidas diversas bases e testadas com os materiais SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304. As melhorias foram evidentes conforme os testes e investigações realizadas.

PALAVRAS-CHAVE:

CAD;
CAE;
Método de Elementos Finitos;
Total deformation;
von-Mises.

INTRODUÇÃO

Por meio do estudo dos conceitos envolvidos nas análises e simulações por Elementos Finitos e dos materiais SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304, foi desenvolvida uma base de aço com o objetivo de minimizar a deformação e analisar as tensões e modificações dos materiais sob cargas e pesos aplicados. A Society of Automotive Engineers International (SAE) é a encarregada de definir as normas para classificar os aços.

O desenvolvimento do projeto necessitou da utilização de 3 softwares. As simulações foram realizadas utilizando o Ansys Engineering Simulation, sendo uma parte da análise conduzida com o Space Claim, que é uma ferramenta de Computer Aided Design (CAD), e o Mechanical, que oferece funções de Computer Aided Engineering (CAE).

O algoritmo Kennard-Stone foi utilizado para validar os modelos e separar amostras que representassem a variabilidade dos dados (KENNARD; STONE, 1969). Com o auxílio dessas ferramentas, foram projetados, desenvolvidos, simulados e analisados materiais e processos visando aprimorar a estrutura da base em questão.

O estudo tem como base a proposta de uma nova base de apoio para o equipamento de unidade condensadora já existente da empresa Prática Klimaquip. Foram considerados diversos materiais, incluindo os aços SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304. Essa estrutura foi desenvolvida sem estudo prévio, baseando-se apenas em experiências empíricas dos colaboradores da empresa Prática Klimaquip. Portanto, o objetivo do projeto foi desenvolver uma nova estrutura que atendesse aos requisitos da empresa e propusesse melhorias com base em um estudo detalhado do comportamento do material e otimização da estrutura.

A estrutura utilizada no estudo foi fornecida pela empresa Prática Klimaquip, localizada em Pouso Alegre, Minas Gerais, que também forneceu os dados para a pesquisa e estudo de caso. Como a empresa atua na indústria alimentícia, os aços inoxidáveis, especialmente o SAE 304, apresentam vantagens como facilidade de limpeza, preservação de sabor e odor, além de serem bem aceitos pelos órgãos de vigilância sanitária. Por isso, esses aços são comumente utilizados em componentes mecânicos que entram em contato com alimentos.

Já que a estrutura não tem contato direto com os alimentos, os aços SAE 1020, SAE 1045 e SAE 4140 foram escolhidos como materiais mais econômicos em comparação aos aços inoxidáveis, sendo utilizados em componentes mecânicos que requerem, respectivamente, baixa, média e alta resistência mecânica. As soldas utilizadas no processo de fabricação são a ER 316L, que é uma solda com eletrodo de tungstênio, conhecida como tungsten inert gas (TIG), é utilizada em peças de aço inoxidável, e a ER70S6, que é uma solda TIG para peças de aço carbono.

O Finite Element Method (FEA) é um procedimento que visa resolver equações diferenciais complexas, analisando inúmeros elementos que possuem nós e se deslocam com a aplicação de cargas. As análises realizadas neste trabalho são aplicadas a processos estruturais e térmicos. Dhatt, Lefrançois e Touzot (2012) abordam o uso do FEA para a modelagem de estruturas e sua utilidade.

O FEA gera diversos resultados, como tensões, deslocamentos e deformações. Inicialmente, é criada uma estrutura no CAD, definindo-se os materiais, e no CAE são realizadas as simulações e obtidos os resultados.

A utilização da simulação busca analisar com precisão o produto ou projeto e melhorá-lo de forma significativa. A utilidade do FEA está presente em inúmeros problemas no campo da Engenharia.

A qualidade das soluções encontradas depende das condições estabelecidas e da capacidade da máquina em tolerar as simulações. Por meio do software, é possível calcular o comportamento dos elementos e da estrutura em geral.

A tensão de von-Mises é definida como um pós-processamento amplamente utilizado na validação estrutural de materiais dúcteis, levando em consideração fatores como a energia de distorção de um elemento. Além disso, pode-se considerar como a energia necessária para que ocorra uma mudança de forma em um elemento. É importante ressaltar que Bonte, De Boer e Liebrechts (2007) discordam de Preumont et al. (2003), informando que em seus estudos sobre tensões, alguns deslocamentos não foram levados em consideração, gerando resultados errôneos.

Após uma análise criteriosa e comparação dos resultados, tornou-se importante apresentar a base ideal para a empresa Prática Klimaquip, fabricante de fornos, que se tornam eficientes quando aplicados corretamente aos princípios termodinâmicos (ALMEIDA, 2013). Após essa análise cuidadosa, todos os resultados e progressos obtidos foram apresentados, conforme desenvolvidos ao longo de todo o projeto.

MATERIAIS E MÉTODOS

O aço SAE 304 é um aço inoxidável 100% reciclado que pertence à família dos austeníticos. Sua composição contém ferro, cromo e níquel, sendo normalmente encontrado na indústria do petróleo (BAJARES; DI MELLA, 2015). Ele possui alta resistência à oxidação e corrosão, boa conformabilidade e soldabilidade, além de sofrer pouca deformação quando exposto ao calor e a altas variações de temperatura. Esse tipo de aço é amplamente utilizado nas áreas alimentícia, farmacêutica, hospitalar, química e aeroespacial, oferecendo um excelente custo-benefício. Em muitos casos, é escolhido nessas áreas devido à sua alta resistência a substâncias que podem causar contaminação química.

Já o aço SAE 1020 é um aço carbono com boas características de plasticidade, forjabilidade e soldabilidade, além de apresentar baixa resistência mecânica e temperabilidade. É comumente utilizado como aço para cementação e possui ampla aplicação na área agrícola, em máquinas, elementos de máquinas, equipamentos e construção estrutural.

Existem diversas comparações entre aços, e Costa et al. (2014) mencionam a separação da ferrita e perlita em seus processos, com base em estudos das microestruturas dos materiais.

O aço SAE 1045 é um aço carbono com boas propriedades mecânicas, resistência média, pouca temperabilidade, excelente forjabilidade e resistência à fratura. Ele é amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos que requerem alta resistência.

Já o aço SAE 4140 é um aço carbono com temperabilidade média, boa ductibilidade, boa resistência à fadiga e à fratura, além de

apresentar alta capacidade de endurecimento. É um aço de baixa liga muito versátil, com diversas aplicações, como na área aeroespacial, petróleo, gás, automotiva e agrícola (AMANO; ROHATGI, 2011).

O nylon pertence à família das poliamidas e é uma fibra têxtil sintética. Antes da injeção do material, é necessário realizar uma secagem para evitar manchas e diferenças de viscosidade. O nylon possui ótima resistência ao desgaste e tração, além de excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Atualmente, é amplamente utilizado na indústria 3D, mas também possui diversas outras aplicações. Ele foi a primeira fibra têxtil completamente sintética a ser comercializada e possui resinas com baixo ponto de fusão (BURKINSHAW, 1995).

Para as soldas, utiliza-se a solda TIG ER 316L quando há necessidade de alta resistência à fluência em altas temperaturas e ao ataque químico por líquidos corrosivos. Essa solda proporciona um acabamento perfeito do cordão de solda e excelentes propriedades mecânicas. Envolve o uso de um eletrodo que passa pela corrente e pelos metais soldados.

A solda metal inert gas (MIG) é um processo que utiliza um arame consumível como eletrodo e necessita de um gás de proteção inerte para que não ocorra a oxidação do metal durante a usinagem. A MIG ER 70S6 é mais barata e mais fácil de manusear. Nesse caso, é utilizado um gás para proteger a solda, o que resulta em uma solda livre de impurezas. Esse tipo de solda envolve a alimentação de arame conectado a um eletrodo que derrete junto ao projeto. Ela permite uma soldagem mais rápida, com menor perda de material de deposição.

É essencial inspecionar a soldagem com precisão para evitar defeitos, pois existem diversas imperfeições que podem afetar o produto. Por isso, é necessário planejar estratégias para superar essas adversidades (KUMAR; NATAJARAN; ANANTHAN, 2012).

O aço é definido como uma liga metálica composta principalmente por ferro e carbono, embora na maioria dos casos haja outros elementos presentes nessa mistura. Compreende-se, portanto, que a adição de diferentes materiais nessa mistura causa uma ampla variação nas propriedades químicas e físicas do aço.

Os aços carbono e ligados são os dois tipos de aço mais utilizados. No entanto, para escolher o aço ideal, é necessário levar em consideração a aplicação desejada, a fim de que ele cumpra adequadamente a função designada.

No contexto desse estudo, o foco recai nos materiais SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304. Ressalta-se que as propostas de análise foram feitas com base nos materiais que a empresa possui, utiliza no cotidiano e são facilmente encontrados no mercado. Portanto, não foi realizada uma análise criteriosa de outros materiais que não trariam benefícios adicionais.

As características dos materiais fornecidos pela empresa também foram reproduzidas nas simulações, utilizando a mesma extensão, a fim de evitar falhas nas análises.

A análise estrutural utilizando o FEA tem como objetivo obter resultados, levando em consideração principalmente os fatores de tensão, deformação e deslocamento da base.

Para o desenvolvimento de um projeto utilizando o FEA, é necessário ter o desenho prévio do projeto, definir os materiais a serem utilizados (que serão alterados neste caso para fins comparativos), gerar a malha com o refinamento adequado para cada situação, definir os pontos de massa e restrições do desenho, e por fim, realizar a análise e obter os resultados.

De acordo com Judice (2012), a sensibilidade e o refinamento da malha têm influência significativa na simulação e análise, e essa variação pode ser testada com três tipos de malha (fina, moderada e grossa), o que também afeta a quantidade de elementos e nós. Após obter os resultados, não basta apenas observá-los de forma superficial, é necessário analisá-los detalhadamente para garantir que a escolha e o estudo tenham sido feitos com precisão.

Conforme Reedy (2019), os métodos exatos de análise para algumas equações são altamente complexos, dificultando sua realização. Portanto, os métodos numéricos de análise possibilitam a resolução dessas equações com o auxílio de computadores.

Os resultados das análises são apresentados em forma de escalas de cores, facilitando a visualização. Por padrão, o menor valor é representado em azul escuro e o maior em vermelho, e essa escala é mantida.

O deslocamento tem como objetivo compreender o movimento do produto em resposta à aplicação de uma força, permitindo avaliar as regiões e suas consequências antes e depois da aplicação da força.

Já a deformação representa a variação da forma de um corpo quando submetido à aplicação de uma força. Destaca-se que é

importante analisar a linearidade do comportamento e a porcentagem da deformação para avaliar sua reversibilidade (HUFNAGEL, SCHUH, FALK, 2016). A deformação pode ser expressa pela Equação (1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Na qual:

ε : Deformação;

σ : Tensão;

E : Módulo de Elasticidade.

É importante destacar que há uma forte relação entre os valores encontrados na deformação e na tensão máxima. A faixa de maior valor em uma delas provavelmente será a mesma na outra.

O conceito de tensão média e suas aplicações para análise estrutural é dado por Nuismer e Labor (1978). A tensão está diretamente associada a dois limites: o limite de escoamento e o limite de ruptura do material em questão. Essa análise pode ser expressa matematicamente da seguinte forma, conforme exibido na Equação (2).

$$\sigma = \frac{M_f \cdot y}{I} \quad (2)$$

Na qual:

σ : Tensão normal no ponto de aplicação;

M_f : Componentes do momento interno resultante ao longo do eixo;

y : coordenada em relação ao eixo;

I : Momento principal de inércia em torno do eixo.

O FEA é um método numérico oferece uma abordagem aproximada para facilitar os cálculos, permitindo resolver problemas que muitas vezes não eram solucionados de forma satisfatória. De acordo com Teixeira-Dias et al. (2010), o FEA possui ampla utilidade no estudo de fenômenos em diversas áreas do conhecimento, sendo possível resolver problemas por meio dessa simulação utilizando métodos matemáticos.

Existem diversas análises possíveis no FEA, desde as mais simples, utilizando apenas uma dimensão, até propostas bidimensionais, tridimensionais e com modelos avançados que incluem outros métodos. Com o objetivo de simplificar as análises e facilitar a compreensão, em muitos casos, utiliza-se elementos em forma de barra para estudar individualmente o comportamento da deformação axial dessas barras. Essa análise permite obter aproximações do deslocamento axial da barra, representando geometricamente um elemento.

Para determinar e encontrar a Matriz de Rigidez de um elemento genérico, denominado e, pode-se utilizar a Equação (3). Yang e McGuire (1986) citam diversas teorias e desenvolvimentos realizados anteriormente para a obtenção da matriz de rigidez. É importante ressaltar que as matrizes de rigidez e flexibilidade são sempre simétricas.

$$k^e = E^e A^e \int_{x_1^e}^{x_2^e} \begin{bmatrix} \left(\frac{dN_1^e}{dx}\right)^2 & \left(\frac{dN_1^e}{dx} \frac{dN_2^e}{dx}\right) \\ \left(\frac{dN_1^e}{dx} \frac{dN_2^e}{dx}\right) & \left(\frac{dN_2^e}{dx}\right)^2 \end{bmatrix} dx \quad (3)$$

Com a utilização dessas matrizes, é possível determinar os deslocamentos que ocorrem na extremidade da viga a partir das ações externas aplicadas. Com base nessas imposições, também é possível determinar os esforços na extremidade da viga.

Conforme Alves (2018), ao aplicar conceitos de notação indicial, tensores, processo incremental e processo iterativo, é possível estabelecer uma formulação geral do FEA que pode ser aplicada em análises não lineares. Através da Análise Lagrangeana Incremental, é possível determinar uma formulação genérica do FEA. A abordagem eurliana-lagrangeana possui grande

importância para a simulação tridimensional de elementos finitos, sendo uma ferramenta poderosa para modelagem numérica de iterações (TEYMOORI; LOHMOUSAVVI; ETESAM, 2016). Essa equação representa o equilíbrio no instante considerado e leva em conta as variações e tensores de deformação infinitesimal, conforme descrito na Equação (4).

$$\int_{V(t+\Delta t)} \sigma_{ij}(t + \Delta t) \cdot \delta e_{ij}(t + \Delta t) \cdot dV - \delta r_{\text{externo}} \quad (4)$$

Onde:

$\sigma_{ij}(t + \Delta t)$: Componentes cartesianos das tensões de Cauchy;

δ : Variação;

$e_{ij}(t + \Delta t)$: Componentes cartesianos das deformações infinitesimais.

É válido ressaltar que existem diversos trabalhos que abordam o FEA de forma matemática, sendo um processo altamente complexo. Devido a essa complexidade, a utilização de softwares facilita a resolução de problemas que envolvem elementos finitos. Essas ferramentas computacionais permitem uma análise mais rápida e eficiente, fornecendo resultados precisos e auxiliando no processo de tomada de decisão.

O cálculo das tensões de von-Mises tem como objetivo demonstrar as condições nas quais o material inicia seu escoamento. Essa análise é fundamental para problemas relacionados à plasticidade. O estudo pode ser realizado com base nos estados de tensão e deformação nos eixos do material. A tensão de von-Mises é determinada de acordo com a Equação (5).

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5)$$

Na qual:

σ_e : Tensão equivalente de von-Mises;

σ_1 : Tensão máxima principal;

σ_2 : Tensão média principal;

σ_3 : Tensão mínima principal.

O cálculo das tensões de von-Mises também pode ser descrito pela Equação (6), quando se trata de casos biaxiais, onde as tensões principais são representadas nos dois eixos e a tensão cisalhante no plano normal.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \quad (6)$$

Na qual:

σ_e : Tensão equivalente de von-Mises;

σ_x : Tensão no eixo x;

σ_y : Tensão no eixo y;

τ : Tensão cisalhante.

O critério de von-Mises está diretamente relacionado com as tensões de cisalhamento máximas. Foi proposto que o escoamento ocorre quando o segundo invariante da tensão de desvio excede um valor crítico máximo. Para complementar essa teoria, Hencky definiu a energia total de deformação, que depende da variação de volume e da forma (SHRIVASTAVA; GHOSH; JONAS 2012). O cálculo dos coeficientes e dos dados necessários é realizado de acordo com as Equações (7a) e (7b) fornecem os coeficientes, enquanto a Equação (8a), (8b) e (8c) representam a Regra de Cramer, enquanto a Equação (9) é dada pelo cálculo do determinante interno. Tal desenvolvimento representa o método do determinante com potencial interior do elemento, utilizando coeficientes, determinantes e a Regra de Cramer, de forma simplificada.

$$\begin{bmatrix} V_{e_1} \\ V_{e_2} \\ V_{e_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e_1} \\ V_{e_2} \\ V_{e_3} \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$a = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} V_{e_1} & x_1 & y_1 \\ V_{e_2} & x_2 & y_2 \\ V_{e_3} & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$b = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 & V_{e_1} & y_1 \\ 1 & V_{e_2} & y_2 \\ 1 & V_{e_3} & y_3 \end{bmatrix} \quad (8b)$$

$$c = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & V_{e_1} \\ 1 & x_2 & V_{e_2} \\ 1 & x_3 & V_{e_3} \end{bmatrix} \quad (8c)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \{x_2y_3 + x_3y_1 + x_1y_2 - x_2y_1 - x_1y_3 - x_3y_2\} \quad (9)$$

Nas quais:

a: Coeficiente 1

b: Coeficiente 2

c: Coeficiente 3

D: Determinante

V_e: Potencial no interior do elemento

Conforme mencionado por Alves (2018), os cálculos devem ser realizados de forma não linear, levando em consideração que a rigidez varia ao longo do carregamento. É necessário analisar os parâmetros que causam essa variação e compreender a quantificação dessas variáveis.

As equações apresentadas nos Capítulos 3 e 4 são de natureza genérica e, em sua forma geral, os softwares de simulação utilizados possuem funções que executam cálculos complexos, gerando milhares de linhas de código. Isso permite obter resultados precisos e confiáveis.

Revisão da literatura

De acordo com Buriticá (2019), após a análise de diferentes corpos de prova, diferentes eletrolíticos e técnicas eletrolíticas, constatou-se que o aço SAE 304 apresenta maior resistência em ambientes altamente corrosivos. De Freitas, Neto e De Souza (2016) apontam que peças que requerem alta resistência mecânica e ao desgaste podem ser obtidas por meio do processo de têmpera de óleo e cementação, e análises micrográficas precisas foram realizadas no SAE 1020.

Segundo Stein et al. (2005), é possível otimizar a resistência mecânica e ductibilidade do aço SAE 1045 através da utilização de processos de tratamento térmico, como a têmpera seguida de revenimento. Rios, Amaral e Souza (2016) afirmam que o aço SAE 4140 apresenta uma microestrutura grosseira de ferrita e perlita após passar por processos de recozimento, têmpera e revenimento. Trajano (2016) destaca que a Poliamida 11 apresenta um menor índice de deformação em temperaturas de 50°C, 70°C e 90°C, porém é importante ressaltar que, quando o material apresenta fragilidade, existe o risco de ruptura. Guilherme et al. (2014) afirmam que a solda TIG ER 316L é amplamente utilizada devido às suas notáveis propriedades de ductibilidade, resistência à corrosão e soldabilidade, sendo uma escolha adequada para aplicações em altas temperaturas. Cunha (2007) menciona que o tipo de solda MIG ER 70S6 possui características apropriadas de desoxidação e tenacidade no local de aplicação, sendo importante

para evitar possíveis falhas e suas graves consequências.

Azevedo (2003) ressalta que análises estruturais abrangentes são viáveis para compreender as mudanças nas características e buscar ajustar o projeto de forma a ser viável tanto em termos de tempo quanto financeiramente. Marques e Da Silva (2009) afirmam que materiais como o aço são influenciados pela esbelteza dos elementos estruturais ou de suas seções, o que torna mais suscetíveis a fenômenos de instabilidade. Ribeiro (2009) destaca que as variações termomecânicas são analisadas devido ao fato de que mudanças de temperatura têm influência direta nas propriedades e deformações térmicas de estruturas mecânicas, sendo necessário avaliar se isso será prejudicial ao sistema. Norton (2013) menciona que o método das tensões octaédricas, equivalente à tensão de von-Mises, é a escolha ideal para prever falhas em carregamentos envolvendo materiais dúcteis, embora possa haver outras abordagens.

Segundo Alves (2018), utilizando conceitos de notação indicial, tensores, processo incremental e processo iterativo, é possível estabelecer a formulação geral do FEA em casos de uso não lineares. Donato e Bianchi (2011) afirmam que a tensão de von-Mises é usada em ensaios de falha de materiais dúcteis, sendo concordante com a energia de distorção, o que indica que tração e compressão são tratadas de maneira semelhante. De Souza (2003) destaca a importância do grau de liberdade no FEA, que se refere à movimentação das partículas. Em geral, corpos tridimensionais possuem seis graus de liberdade.

A empresa Prática Klimaquip considerou a possibilidade de utilizar uma base projetada para suportar uma unidade condensadora por espiral de congelamento, com o objetivo de congelar grandes quantidades de alimentos de forma contínua e em alta escala. Esse equipamento de espiral de congelamento possui um alto volume e peso, e para evitar que fiquem diretamente apoiados no chão, são utilizados apoios que sustentam a estrutura e os componentes com funções exclusivas de apoio.

Os componentes possuem posições e pesos pré-definidos, os quais não podem ser modificados durante o desenvolvimento da nova estrutura. Além disso, foi disponibilizada uma lista de chapas e vigas para utilização, sendo que o material destes deve ser um dos três aços mencionados anteriormente.

O primeiro teste foi realizado de forma experimental, com o intuito de replicar a base já existente e compreender quais eram suas principais deficiências. Após entender o funcionamento e objetivo da base, foi possível desenvolver diversos testes até chegar ao modelo ideal utilizado na proposta.

O propósito, após a definição das bases ideais, é avaliar a robustez da estrutura, os custos da matéria-prima e os processos de fabricação, a fim de compreender se os experimentos realizados realmente representam melhorias.

Inicialmente, foi utilizada a versão estudantil do software Ansys Engineering Simulation, o que limitou a possibilidade de refinamento da malha. Após o desenvolvimento dos experimentos, a mesma simulação foi feita na versão empresarial, obtendo resultados superiores que foram utilizados.

Alguns outros itens que podem variar na estrutura e serão levados em consideração são:

- Massa da estrutura;
- Quantidade de pontos ou cordões de solda;
- Quantidade de componentes diferentes.

O ciclo de compressão de vapor é um ciclo termodinâmico que define o funcionamento de refrigeradores, com o objetivo de resfriar o espaço desejado. O fluido refrigerante circula no ciclo com a finalidade de absorver e retirar o calor do local, rejeitando-o para outro ambiente. O ciclo é composto pelos seguintes componentes:

- Acumulador de sucção: impede que o líquido refrigerante retorne para o compressor;
- Compressor: circula o líquido refrigerante na parte interna do circuito, retirando o gás do evaporador, comprimindo-o e elevando a pressão relacionada à condensação;
- Condensador: trocador de calor semelhante a um evaporador, que dissipa o calor do fluido refrigerante do sistema;
- Evaporador: absorve o calor para o sistema, recebendo o líquido refrigerante frio e com baixa pressão, vaporizando-o internamente;
- Separador de óleo: reduz a quantidade de lubrificação circulante nas unidades onde há a possibilidade de despejo e queda de óleo;

- Tanque de líquido: reservatório do fluido refrigerante para o sistema, garantindo uma quantidade segura durante todo o período de uso;
- Válvula de expansão: reduz a temperatura e pressão do fluido, garantindo que a entrada do fluido seja realizada corretamente para que a evaporação e outros processos sejam concluídos adequadamente.

Os componentes são considerados pontos de massa, e sua presença causa deslocamentos, tensões e outros impactos na estrutura. Outro aspecto a ser considerado é o local onde os garfos da empilhadeira pegam a base, onde forças são aplicadas. É necessário levar esses detalhes em consideração para evitar flexões durante o transporte da base.

Apesar de ter sido estudada a possibilidade de utilizar chapas, concluiu-se que não era viável. Essas chapas deveriam ter largura inferior a 1.000,00 mm e comprimento inferior a 2.000 mm. Já as vigas não poderiam ter comprimento maior que 4.000,00 mm.

As posições dos componentes não podem ser alteradas, a fim de manter o padrão solicitado pela empresa. Além disso, é importante prestar atenção aos tubos e seus apoios. Caso seja removida alguma viga no local de apoio, a base e o sistema proposto apresentarão problemas e não funcionarão conforme o desejado, o que resultará na rejeição da proposta.

Na Figura 1, é possível identificar cada um dos itens mencionados anteriormente e suas respectivas localizações na base. Já na Tabela 1, observam-se as dimensões em mm e os pesos em quilogramas de cada um dos componentes do sistema de refrigeração.

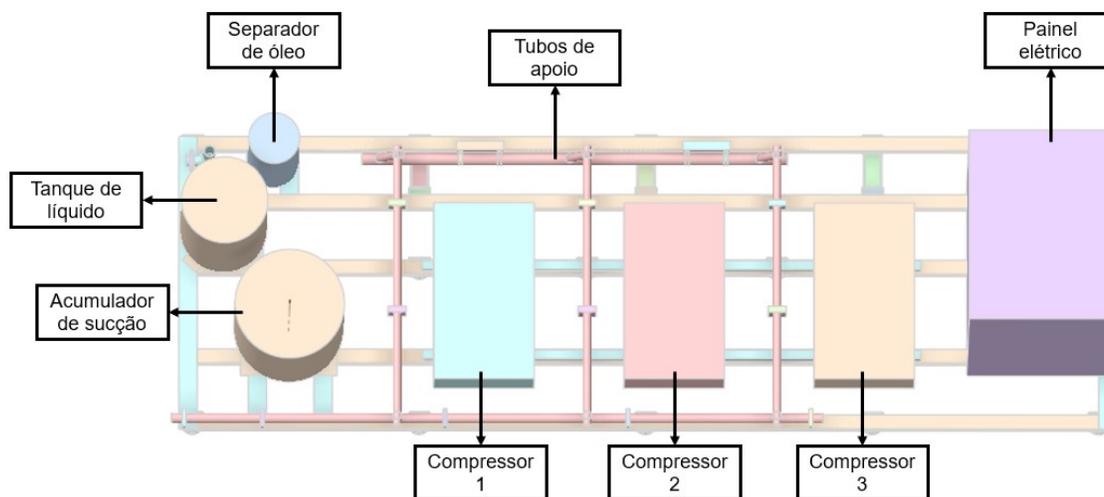


Figura 1 – Componentes do ciclo de refrigeração

Tabela 1 – Dimensões e pesos dos componentes

Componente	Volume [m ³]	Peso [kg]
Acumulador de sucção	0,1426	124
Compressor 1	0,1058	234
Compressor 2	0,1058	234
Compressor 3	0,1058	234
Painel elétrico	1,0139	143
Separador de óleo	0,0309	40
Tanque de líquido	0,1098	171
Tubos e apoios	0,0364	348

A base fornecida inicialmente pela instituição era composta por uma grande quantidade de componentes, com muitas conexões por cordões de solda e utilização exclusiva de vigas de perfil “U”. Além disso, a estrutura apresentava um valor elevado de deformação geral da estrutura que é dada pelo Total Deformation que era de 35,12 mm.

Uma das primeiras melhorias realizadas na base foi a introdução de vigas de perfil “I”, além das vigas “U”. Embora as vigas “I” tenham um peso maior, sua função estrutural influencia significativamente no desempenho, reduzindo a deformação geral e as

tensões. O ganho de peso é compensado de forma significativa pelos benefícios estruturais proporcionados.

A substituição das vigas “U” no eixo “z” por vigas de perfil “I” teve um grande impacto nos resultados encontrados. Essa alteração foi avaliada por meio da análise do torque. Como as distâncias no eixo “z” a partir do ponto 0 são muito maiores em comparação com os outros eixos, essa substituição contribuiu para a evolução do projeto e redução do deslocamento.

Além dessas mudanças, foram feitos reforços pontuais nas áreas do acumulador de sucção, separador de óleo e tanque de líquido, que eram os locais mais destacados e que necessitavam de maior atenção.

Outras alterações significativas foram a remoção de componentes que não contribuíam de forma relevante para a estrutura. Diversas vigas no eixo “x” estavam distribuídas de forma desordenada, aumentando apenas o peso da estrutura e a quantidade de cordões de solda, sem contribuir para as deformações, deslocamentos e tensões.

Além disso, a única chapa presente na estrutura foi substituída por uma viga, reduzindo a quantidade de componentes distintos no projeto. Antes, a base possuía uma alta quantidade de peças diferentes, o que dificultava a produção. Com a alteração, agora há apenas 6 peças diferentes em seu modelo.

Outra modificação realizada foi a rotação das vigas nas quais os compressores se apoiam em 45°, e a alteração da posição dos apoios, o que auxiliou na redução dos deslocamentos e na diminuição da quantidade de solda utilizada. Observa-se que a maior concentração de peças está localizada próxima à origem do eixo “z”, uma vez que a maioria dos componentes está presente nessa área e era onde ocorria o maior deslocamento e deformação.

Com o auxílio do CAE, é possível criar e investigar cenários, antecipando riscos que possam comprometer o desenvolvimento do projeto ou do produto. O CAE tem o objetivo de encontrar estratégias e técnicas para prever e minimizar possíveis erros.

As análises realizadas com essa tecnologia são diversas, abrangendo áreas como estática, fluidos, dinâmica, térmica, eletromagnética e acústica. Elementos fixos, pontos de apoio, pontos de massa e interações foram características importantes no desenvolvimento do trabalho.

As principais características do CAE são: aumento da eficiência e qualidade da análise, alta confiabilidade com redução de custos, eliminação de gastos de tempo desnecessários e facilidade para alterar e compartilhar o projeto. De acordo com o manual do software, os resultados obtidos nas simulações foram embasados e compreendidos por meio do estudo das seguintes análises e comparações:

- Total Deformation (Deformação total): Deslocamentos e tensões, representando a deformação geral da estrutura, calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das deformações nas direções x, y e z.
- Equivalent Elastic Strain (Deformação elástica equivalente): Medida do alongamento ou contração de um segmento hipotético de linha dentro de um corpo por unidade de comprimento.
- Maximum Principal Elastic Strain (Deformação principal elástica máxima): Indica que a falha de um material ou componente ocorrerá quando o valor máximo da deformação principal desenvolvida no corpo exceder o limite de deformação.
- Minimum Principal Elastic Strain (Deformação principal elástica mínima): A deformação elástica total tem seu valor mínimo na configuração de equilíbrio.
- Equivalent Stress (Tensão equivalente): Baseada na teoria de von-Mises-Hencky, um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von-Mises se iguala ao limite de tensão. Ela permite representar qualquer estado de tensão tridimensional arbitrário em um único valor de tensão positivo.
- Maximum Principal Stress (Tensão principal máxima): A falha ocorrerá quando a tensão principal máxima em um sistema atingir o valor de resistência máxima no limite elástico de tração.
- Minimum Principal Stress (Tensão principal mínima): Tensão de menor magnitude, mais compressiva, também conhecida como tensão de compressão máxima.

Foram realizadas várias alterações na base, sendo que cada modificação gerava uma nova simulação em busca do conjunto ideal. A Figura 2 mostra as mudanças feitas na base original para a projetada, ao qual a primeira é a base atual e a segunda a base projetada. É importante ressaltar que os resultados apresentados foram obtidos por meio de simulações.

Apesar da base proposta possuir uma quantidade inferior de peças, o peso da estrutura é 19 kg maior. Isso se deve ao fato de a base ter quatro vigas “I”, cujo peso tem grande influência. No entanto, caso essas vigas “I” fossem substituídas por vigas “U”, embora ainda apresentassem um desempenho melhor do que o anterior, os valores obtidos seriam drasticamente reduzidos. A substituição das vigas foi um importante fator de melhoria.

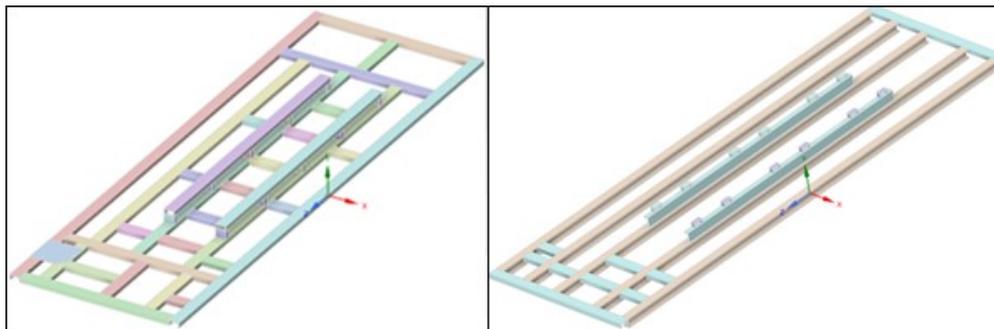


Figura 2 – Modificações na base

Com a análise da Total Deformation, é possível avaliar os resultados das deformações obtidas no modelo em suas três coordenadas. Já a Equivalent von-Mises Stress leva em conta dados sobre a energia de distorção necessária para alterar a forma do elemento.

Conforme ilustrado na Figura 2 mencionada anteriormente, houve grandes mudanças nos resultados obtidos da base anterior para a base proposta. No entanto, os materiais SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304 não apresentaram diferenças significativas e consideráveis. Ao analisar a Figura 3 e a Figura 4, pode-se compreender os valores de Total Deformation e Equivalent von-Mises Stress para o aço SAE 1020. O deslocamento total apresenta um valor máximo de 4,37 mm, enquanto a tensão de von-Mises tem um valor máximo de 127,54 MPa.

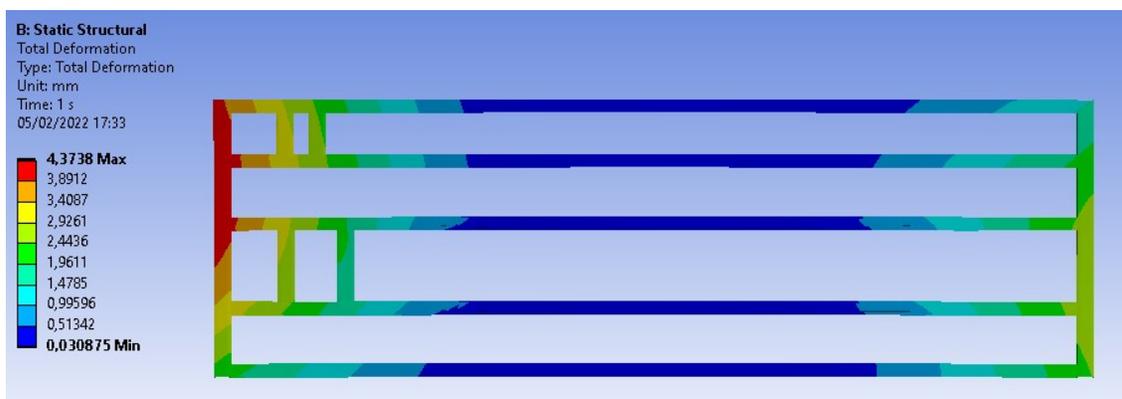


Figura 3 – Total Deformation SAE 1020

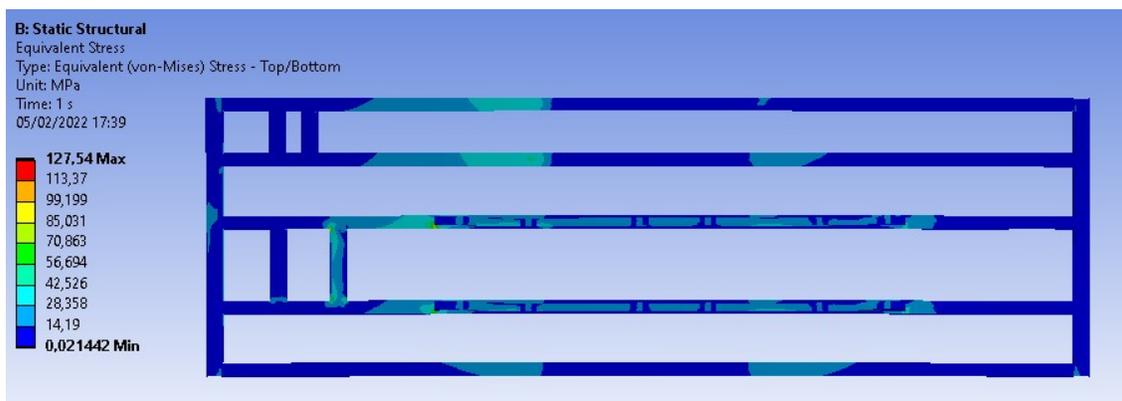


Figura 4 – Equivalent von-Mises Stress SAE 1020

Ao avaliar a Figura 5 e a Figura 6, é possível compreender os valores de Total Deformation e Equivalent von-Mises Stress para o aço SAE 1045. Com pouca variação em relação ao aço SAE 1020, o valor máximo de deslocamento total também está em torno de 4,12 mm, representando o menor valor entre as três propostas. A tensão de von-Mises permanece na faixa de aproximadamente 127,54 MPa.

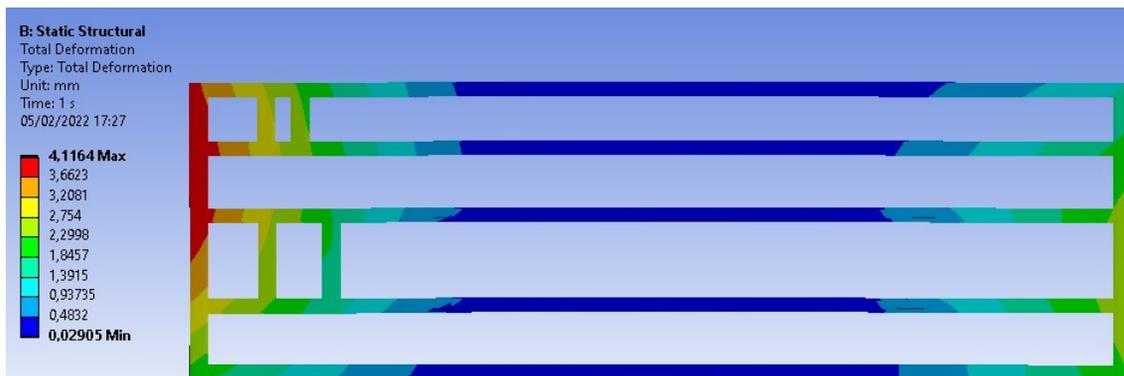


Figura 5 – Total Deformation SAE 1045

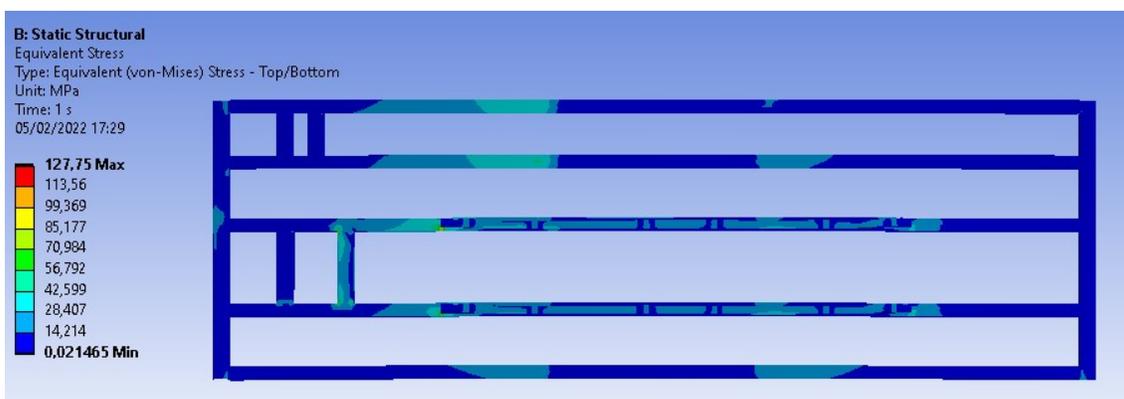


Figura 6 – Equivalent von-Mises Stress SAE 1045

Ao avaliar a Figura 7 e a Figura 8, é possível compreender os valores de Total Deformation e Equivalent von-Mises Stress para o aço SAE 304. A deformação total, apesar de estar próxima aos outros aços, é a mais alta entre as três, com 4,53 mm. Por outro lado, a tensão de von-Mises máxima é a menor entre as propostas, com 127,20 MPa.

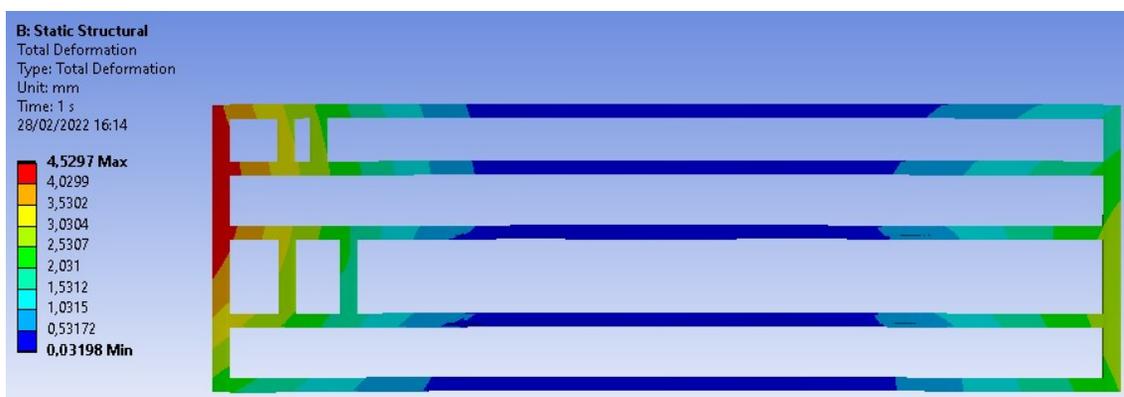


Figura 7 – Total Deformation SAE 304

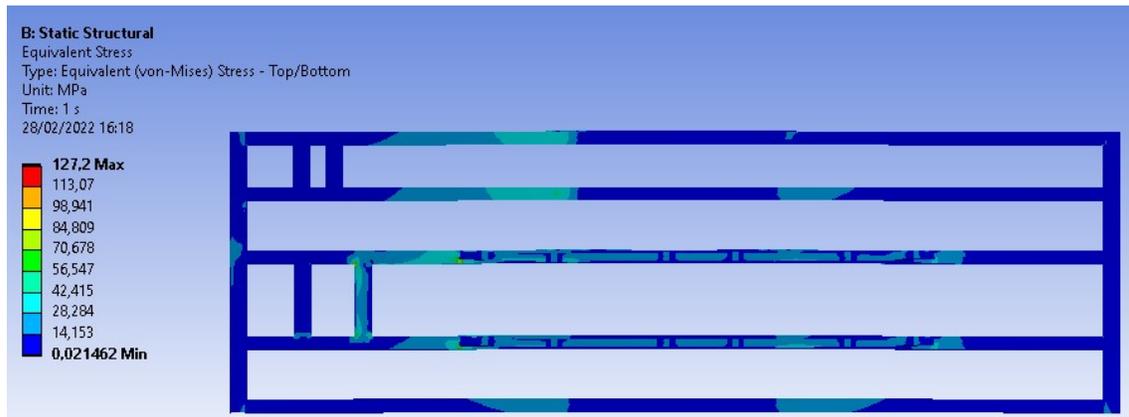


Figura 8 – Equivalent von-Mises Stress SAE 304

Com base nisso, é possível fazer uma comparação criteriosa dos valores máximos e mínimos em cada cenário. Apesar de a troca de material ter causado poucas alterações nos resultados estruturais, isso significa que, por meio da simulação, as três bases teriam a possibilidade de serem utilizadas. No entanto, é importante levar em consideração o custo e outros fatores que possam influenciar na escolha final.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para encontrar o resultado desejado, foi necessário criar outras 9 bases, com foco em reduzir o deslocamento da estrutura. A base ideal resultante aumentou o peso em 20 kg, porém houve uma drástica redução na quantidade de cordões e pontos de solda, na quantidade de modelos de peças diferentes, no deslocamento total e na tensão de von-Mises, entre outros fatores identificados durante a análise das simulações.

O objetivo principal da pesquisa era minimizar o deslocamento total da estrutura, o qual foi considerado mais importante do que outros fatores, como o peso. Em alguns momentos, foram feitas concessões em outros aspectos para enfatizar o que era prioritário. Inicialmente, os testes foram realizados utilizando apenas um material, com o objetivo de descobrir a melhor base possível e, posteriormente, definir o material a ser utilizado. É importante ressaltar que, em alguns casos, melhorar um fator pode resultar em uma redução em outro.

Na Figura 9, é possível observar as modificações no peso da estrutura ao longo do desenvolvimento das bases. Em seguida, na Figura 10, é apresentada a quantidade total de cordões e pontos de solda nas junções. A Figura 11 mostra o deslocamento total da estrutura, e, por fim, na Figura 12, é expressa a quantidade de modelos diferentes de peças.

A base atualmente utilizada, construída pela Prática Klimaquip, apresentou o menor peso, enquanto o quarto experimento teve o maior peso. A primeira base construída tinha um alto número de cordões de solda, enquanto a nona base teve uma redução drástica nesse aspecto. A quantidade de modelos diferentes de peças utilizadas inicialmente era bastante elevada, mas a base proposta finalmente reduziu para menos da metade desse valor. Por fim, o deslocamento total da estrutura obtida teve uma redução de 88,47% em relação à base inicialmente disponibilizada.

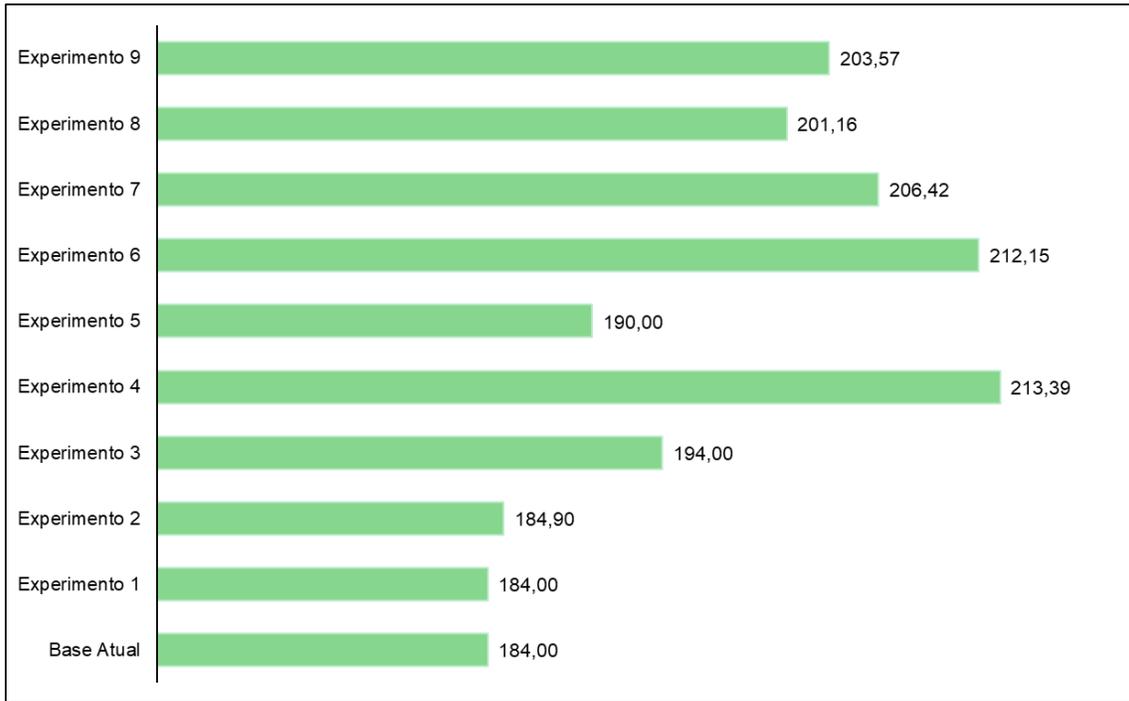


Figura 9 – Evolução do peso da estrutura [kg] nos experimentos

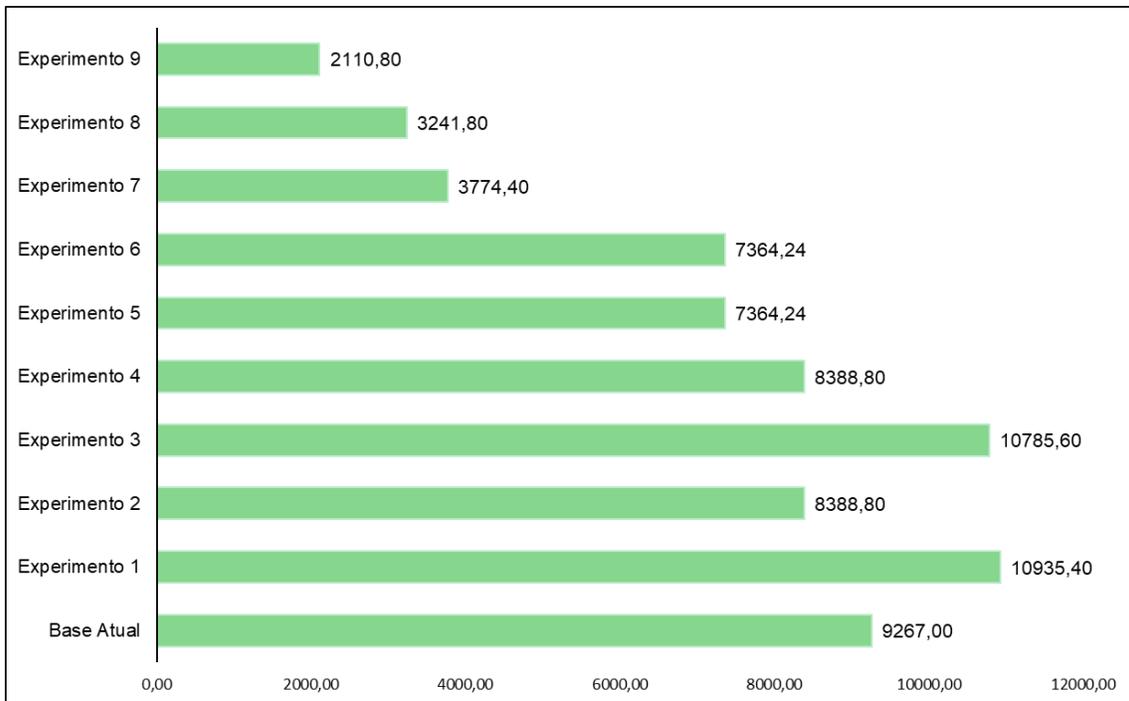


Figura 10 – Evolução do comprimento dos cordões de solda [mm] nos experimentos

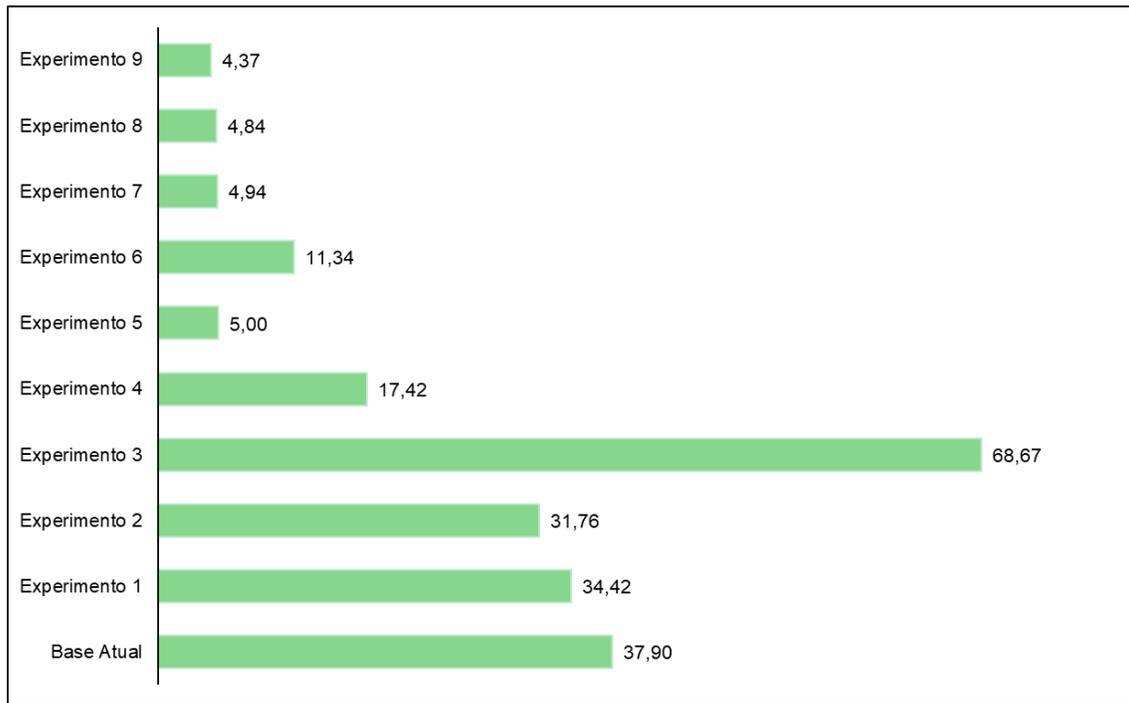


Figura 11 – Evolução do deslocamento total [mm] nos experimentos

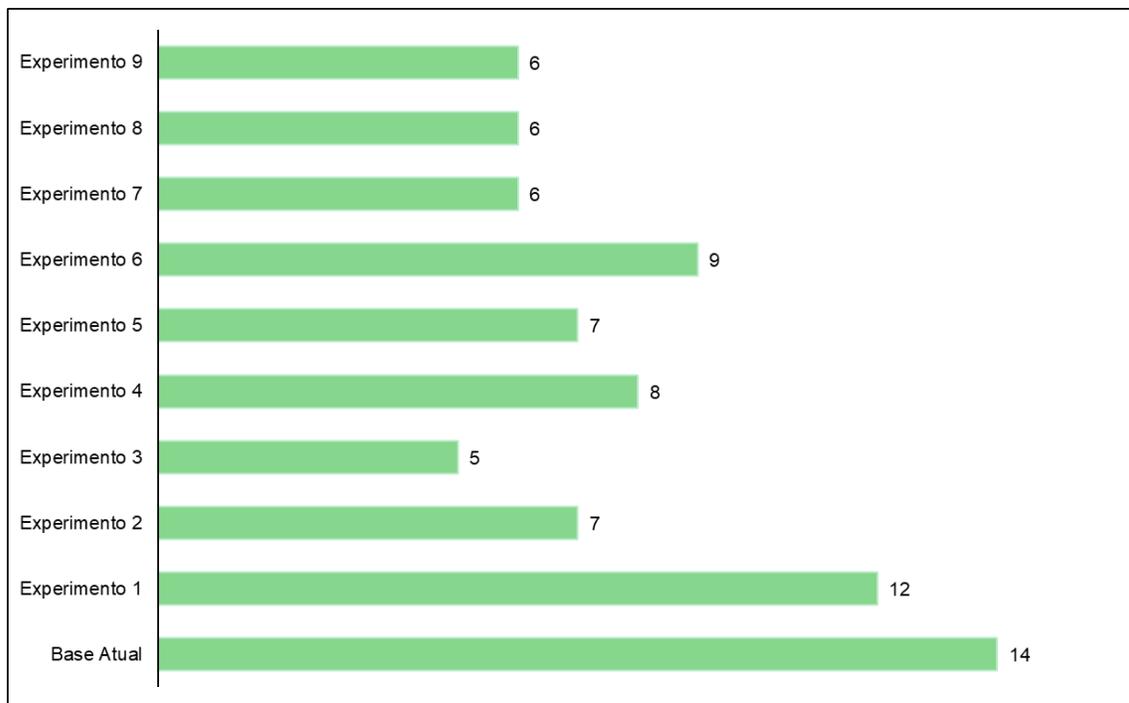


Figura 12 – Evolução da quantidade de modelos diferentes de peças nos experimentos

Após a determinação da melhor base por meio da análise criteriosa dos dados, a próxima etapa é compreender qual é o melhor material a ser utilizado. Para essa análise, foram utilizados 7 parâmetros descritos e definidos na seção Análise CAE.

É importante destacar que foram realizadas apenas análises estruturais e não foram considerados os preços dos materiais. Segundo a empresa, essa análise estava em segundo plano, e o software Ansys foi capaz de fornecer os resultados necessários. No entanto, é preciso analisar com cautela os resultados obtidos, pois o software é apenas uma ferramenta para encontrar o desfecho esperado. Na Tabela 2, é possível observar a diferença nos resultados das simulações entre a base exemplo projetada pela Prática Klimaquip e as 3 bases propostas, que são a mesma base, mas com a alteração do material para SAE 1020 na Proposta 1 e para SAE 1045 na

Proposta 2. A figura também apresenta as unidades de cada uma das variáveis estudadas.

A diferença entre os resultados da base anterior e as propostas foi considerável, e os resultados das bases propostas foram próximos entre si. O aço SAE 304, que é amplamente utilizado em áreas internas de fornos ou em outras partes que estão em contato direto com o alimento, também foi analisado. Portanto, foi realizado um estudo baseado nesse material, que resultou na Proposta 3.

Tabela 2 – Comparação entre bases

Simulações/Experimentos	Anterior (SAE 1020)	Proposta 1 (SAE 1020)	Proposta 2 (SAE 1045)	Proposta 3 (SAE 304)	Unidade
Total Deformation	35,1200	4,3700	4,1200	4,5300	mm
Equivalent Elastic Strain	0,0022	0,0008	0,0007	0,0008	mm/mm
Maximum Principal Elastic Strain	0,0019	0,0006	0,0005	0,0006	mm/mm
Minimum Principal Elastic Strain	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	mm/mm
Equivalent Stress von-Mises	441,8600	127,5400	127,7500	127,2000	MPa
Maximum Principal Stress	406,5700	115,0600	115,1800	114,8300	MPa
Minimum Principal Stress	43,7900	20,4400	20,0400	20,8300	MPa

A Proposta 9 se mostrou a escolha ideal entre as bases projetadas. Foram realizadas análises com três materiais para encontrar a base ideal, e o material SAE 1045 foi escolhido como o melhor. Vale ressaltar que os resultados obtidos foram muito próximos entre si, porém, foram significativamente superiores em relação à base anterior utilizada pela Prática Klimaquip.

Em todas as simulações estruturais, a Base Proposta 9 com SAE 1045 apresentou desempenho amplamente superior em comparação à base anterior. Dessa forma, o projeto foi bem-sucedido ao alcançar resultados muito superiores aos esperados, que eram apenas superar a base atual em alguns detalhes. É importante destacar que todos os pontos críticos encontrados na simulação da base atual foram eliminados, e os valores encontrados nas propostas apresentaram uma evolução significativa em diversos aspectos, conforme mencionado anteriormente.

CONCLUSÕES

O projeto foi concluído com sucesso, obtendo valores completamente satisfatórios em comparação à base existente fornecida pela Prática Klimaquip. Além disso, os resultados alcançados superaram as expectativas estabelecidas para o projeto da empresa.

De acordo com Costa et al. (2021), quando os conceitos, softwares e planejamento são aplicados corretamente e com propósito, é possível obter um alto desempenho.

A descrição matemática dos cálculos do FEA foi apresentada de forma sucinta, com o objetivo de introduzir os princípios, a composição e a formulação dos cálculos.

Foram realizadas análises em nove projetos de bases diferentes. Após esse desenvolvimento, foram comparados três tipos de aço: SAE 1020, SAE 1045 e SAE 304.

A empresa exigiu que os componentes fossem fixados em posições específicas, sem a possibilidade de alterar suas coordenadas em nenhum eixo. Essa restrição inicial foi um desafio, uma vez que pequenas alterações na disposição dos equipamentos poderiam ter um impacto significativo nos resultados obtidos.

Os dados mais relevantes para análises atuais e futuras em casos semelhantes são o deslocamento total e a tensão de von-Mises, pois esses resultados tiveram um impacto mais significativo do que os demais mencionados anteriormente.

A melhor alternativa encontrada para reduzir drasticamente o deslocamento foi o reforço no eixo longitudinal principal, o eixo “z”. Além disso, a escolha dos materiais não teve uma influência tão relevante quanto inicialmente imaginado. Durante os ensaios, observou-se que apenas alguns pontos apresentaram uma tensão de von-Mises próxima ou acima da tensão de escoamento dos materiais.

Com a proposta de melhoria desenvolvida, um protótipo será construído para testar fisicamente a base e realizar uma comparação direta entre a base atual e a base projetada. Caso o teste alcance os resultados esperados, assim como nas análises por simulações, o projeto será aprovado e implementado pela empresa Prática Klimaquip.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Karla Barra de. **Isolamentos térmicos em fornos industriais: um estudo do caso Prática S/A**. 2013.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE**. Saraiva Educação SA, 2018.
- AMANO, R. S.; ROHATGI, P. K. Laser engineered net shaping process for SAE 4140 low alloy steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 22-23, p. 6680-6693, 2011.
- AZEVEDO, Álvaro FM. Método dos elementos finitos. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, v. 1, n. 7, 2003.
- BAJARES, R. A.; DI MELLA, L. Study of the Corrosion Rate in the Couple of Steels ASTM A-36 and AISI/SAE 304 in a Water-coke of Petroleum System. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 702-711, 2015.
- BONTE, M. H. A.; DE BOER, Andries; LIEBREGTS, R. Determining the von Mises stress power spectral density for frequency domain fatigue analysis including out-of-phase stress components. **Journal of sound and vibration**, v. 302, n. 1-2, p. 379-386, 2007.
- BURITICÁ, Sebastián Raigosa. **Evaluación Electroquímica de los aceros inoxidables AISI-SAE 304 em ambientes altamente corrosivos**. 2019. Tese de Doutorado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- BURKINSHAW, Stephen M. Nylon. In: **Chemical Principles of Synthetic Fibre Dyeing**. Springer, Dordrecht, 1995. p. 77-156.
- COSTA, Leonardo FT et al. Hysteresis and Magnetic Barkhausen Noise for SAE 1020 and 1045 Steels With Different Microstructures. **IEEE transactions on magnetics**, v. 50, n. 4, p. 1-4, 2014.
- COSTA, Matheus Pereira et al. Projeto para implementação da manutenção preventiva: Review com estudo de caso simulado. **Revista Científica e-Locução**, v. 1, n. 20, pág. 27-27, 2021.
- CUNHA, Daniella de Sousa. **Desenvolvimento de fio máquina para a fabricação de arames para soldagem MIG, com carepa adequada ao processo de descarepação mecânica**. 2007. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- DE FREITAS, Bruno Mello; NETO, José da Costa; DE SOUZA, REGINALDO. **Microestrutura e microdureza do aço SAE 1020 em diferentes tratamentos térmicos**. 2016.
- DE SOUZA, Remo Magalhães. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. **Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém**, 2003.
- DHATT, Gouri; LEFRANÇOIS, Emmanuel; TOUZOT, Gilbert. **Finite element method**. John Wiley & Sons, 2012.
- DONATO, Gustavo HB; BIANCHI, Marcos. Numerical modeling of uneven thermoplastic polymers behaviour using experimental stress-strain data and pressure dependent von Mises yield criteria to improve design practices. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 1871-1876, 2011.
- GUILHERME, Luis Henrique et al. Resistência à corrosão de junta dissimilar soldada pelo processo TIG composta pelos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, p. 42-50, 2014.
- HUFNAGEL, Todd C.; SCHUH, Christopher A.; FALK, Michael L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments. **Acta Materialia**, v. 109, p. 375-393, 2016.
- JUDICE, Gustavo Henrique. **Análise numérica da propagação de defeitos internos na laminação transversal com cunha**. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button. 2012. 109 pág. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MARQUES, Liliana; DA SILVA, Luís Simões; REBELO, Carlos. Métodos Avançados de análise por elementos finitos para verificação da estabilidade de estruturas metálicas. In: **Congresso de Construção Metálica e Mista VII**. 2009.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. Bookman editora, 2013.
- NUISMER, R. J.; LABOR, J. D. Applications of the average stress failure criterion: part I—tension. **Journal of Composite Materials**, v. 12, n. 3, p. 238-249, 1978.
- REDDY, Junuthula Narasimha. **Introduction to the finite element method**. McGraw-Hill Education, 2019.
- PREUMONT, André et al. **Spatial filters in structural control**. **Journal of sound and vibration**, v. 265, n. 1, p. 61-79, 2003.

- RIBEIRO, José Carlos Lopes. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema computacional para simulação via Método dos Elementos Finitos do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio**. 2009.
- RIOS, Carlos Triveño; AMARAL, Mariana P. do; SOUZA, Evellyn S. Influência de Tratamentos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140. In: **22º CBECiMat–Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 2016. p. 5797-5808.
- SENTHIL KUMAR, G.; NATARAJAN, U.; ANANTHAN, S. S. Vision inspection system for the identification and classification of defects in MIG welding joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 61, n. 9, p. 923-933, 2012.
- SHRIVASTAVA, Suresh; GHOSH, Chiradeep; JONAS, John J. A comparison of the von Mises and Hencky equivalent strains for use in simple shear experiments. **Philosophical Magazine**, v. 92, n. 7, p. 779-786, 2012.
- STEIN, Cristiano Ramos et al. Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045. **Revista Escola de Minas**, v. 58, p. 51-56, 2005.
- TEIXEIRA-DIAS, Filipe et al. **Método dos elementos finitos: técnicas de simulação numérica em engenharia**. 2010.
- TEYMOORI, F.; LOHMOUSAVI, M.; ETESAM, A. Numerical analysis of fluid structure interaction in water jet incremental sheet forming process using coupled Eulerian–Lagrangian approach. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 10, p. 203-210, 2016.
- TRAJANO, Vinícius Siqueira. **Comportamento mecânico do nylon 11 em diferentes temperaturas**. 2016.
- YANG, Yeong-Bin; MCGUIRE, William. Stiffness matrix for geometric nonlinear analysis. **Journal of structural engineering**, v. 112, n. 4, p. 853-877, 1986.