



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

## OTIMIZAÇÃO DO MATERIAL DE VARÕES DE APOIO PARA PEÇAS EM TRATAMENTO TÉRMICO

*OPTIMIZATION OF SUPPORT ROD MATERIAL FOR HEAT-TREATED COMPONENTS*

BORDIN SECCO, Fábio Henrique<sup>1</sup>; SPEGLICH DEGASPARI, Pedro Francisco<sup>1</sup>;  
LOUREIRO, Daniel<sup>2</sup>;

1 - Estudantes do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Campus Campinas.

2 - Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco; Campus Campinas.

**[fabio.secco@mail.usf.edu.br](mailto:fabio.secco@mail.usf.edu.br); [pedro.degaspari@mail.usf.edu.br](mailto:pedro.degaspari@mail.usf.edu.br)**

### RESUMO

Realizar uma análise para definir a geometria e o material mais adequado para a fabricação de um varão de apoio utilizado em peças submetidas a tratamento térmico que foi alcançado por meio da avaliação das propriedades mecânicas, resistência a temperatura e custo de produção, fazendo a princípio uma análise da geometria e o material usado atualmente na peça e, com o auxílio de simulação computacional, realizou-se testes analisando inicialmente sua geometria observando o comportamento da peça em relação aos esforços mecânicos aplicados e analisando também seu comportamento quando colocado a temperatura de operação do forno de tratamento térmico.

**Palavras-chave:** geometria; varão de apoio; tratamento térmico; simulação computacional; esforços mecânicos; temperatura.

### ABSTRACT.

Perform an analysis to determine the geometry and the most suitable material for manufacturing a support rod used in parts subjected to heat treatment. This will be achieved through the evaluation of mechanical properties, temperature resistance, and production cost. Initially, an analysis of the current geometry and material used in the part will be conducted. With the aid of computer simulation, tests will be carried out by initially altering its geometry, observing the behavior of the part in relation to applied mechanical forces, and also analyzing its performance when exposed to the operating temperature of the heat treatment furnace.

**Keywords:** geometry; support rod; heat treatment; computer simulation; mechanical efforts; temperature.

### INTRODUÇÃO

Este trabalho foi motivado pela necessidade em aprimorar a geometria e o material utilizado na fabricação de uma peça que desempenha importante papel no processo de tratamento térmico em um forno. A peça utilizada atualmente enfrenta desafios significativos, resultantes das condições de alta temperatura impostas pelo processo de tratamento térmico e das tensões mecânicas provocadas pelo peso das peças apoiadas no componente. Esses desafios



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

estão contribuindo diretamente para redução de sua vida útil, demandando substituições frequentes e, conseqüentemente, elevando custos operacionais, impactando a eficiência do processo de tratamento térmico como um todo. Portanto, a busca por uma solução mais duradoura e eficaz é indispensável para a otimização desse processo industrial.

## METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa exploratória para aprofundar o entendimento sobre as causas das frequentes quebras do varão de apoio utilizado em peças submetidas a tratamento térmico e propor uma melhoria de acordo com os dados obtidos. Além disso, a pesquisa também apresenta um caráter explicativo, pois visa explicar o motivo das quebras e propor soluções para reduzir a necessidade de substituição do varão, minimizando os custos para a empresa.

A abordagem foi quantitativa e qualitativa para obter uma compreensão abrangente do problema. A abordagem quantitativa foi utilizada para coletar dados numéricos relacionados à resistência do varão e condições operacionais como condições de trabalho do forno de tratamento térmico e esforços mecânicos que as peças exercem sobre ela, além de dados relacionados a valores de custo. A abordagem qualitativa envolverá a coleta de informações subjetivas, como opiniões dos profissionais envolvidos, com o objetivo de obter informações das condições iniciais do varão, como a durabilidade, desempenho durante seu uso e custo de compra, buscando obter dados para analisar o desempenho e valores do varão antes e depois das melhorias propostas. As figuras 1 e 2 exibem o varão de apoio em bom estado e ele fletindo.

**Figura 2.** Varão de apoio em bom estado.



**Fonte:** Próprio autor.

**Figura 1.** Varão de apoio fletindo.

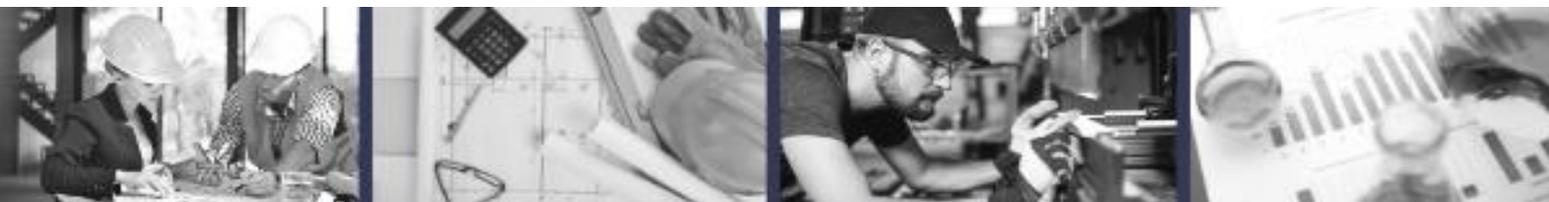


**Fonte:** Próprio autor.

Utilizou-se *software* de análise de elementos finitos (*SolidWorks*) para simulações computacionais para avaliar o comportamento do varão de apoio nas condições de trabalho em questão. Os dados quantitativos obtidos incluíram cargas térmicas e mecânicas, deformações, fatores de segurança, distribuição de temperatura, tensões térmicas, tempo e propriedades do material.

## DESENVOLVIMENTO

O processo produtivo do kit de embreagem fabricado pela Valeo, ocorre dentro de um galpão arejado, em que as peças passam por diversos processos até serem embaladas para distribuição. Um desses processos é o forno, que realiza o tratamento térmico das peças.



## TRABALHO DE GRADUAÇÃO

O operador do forno é responsável por montar os discos do *kit* da embreagem no varão de apoio, distribuindo-as de maneira correta, para que todas as peças sofram o aquecimento uniforme. Após distribuídas, o funcionário encaixa os varões sobre uma grelha, que é levada ao forno através de esteiras.

O equipamento de tratamento térmico em questão é composto por duas atmosferas distintas. A primeira delas, conhecida como atmosfera de têmpera, é caracterizada pela injeção controlada de gases, que, aliados à temperatura aplicada, estabelecem um ambiente controlado. O propósito dessa etapa é promover um aumento na dureza e resistência do aço. Já a segunda atmosfera é destinada ao processo de carbonitreção. Nesse estágio, busca-se enriquecer as superfícies das peças com carbono e nitrogênio, seguido por um resfriamento abrupto. Essa etapa visa potencializar a resistência mecânica e a capacidade de resistência ao desgaste das peças. A Figura 3 ilustra o Forno Aichelin utilizado nesse processo específico de tratamento térmico.

**Figura 3.** Forno Aichelin para tratamento térmico.



Fonte: Próprio autor.

Os elementos estruturais empregados nesse procedimento são constituídos a partir de uma liga fundida denominada como níquel THERM 37-41 HU, amplamente reconhecida como Aço inoxidável martensítico AISI 4140, 1.4021 e DIN X46Cr13. Após aproximadamente um mês de utilização, observa-se que esses elementos começam a manifestar deformações verticais, manifestando flexão e subsequentemente cisalhamento. Esses efeitos são atribuídos à contínua exposição a condições adversas, tais como elevadas temperaturas e solicitações mecânicas intensas. A Figura 4 apresenta as peças posicionadas sob os varões de suporte, instantes antes de serem submetidas ao processo de tratamento térmico em forno.

**Figura 4.** Discos da embreagem distribuídos no varão de apoio causando flexão.



(Fonte: Próprio autor)

O varão é colocado nas seguintes condições de trabalho:



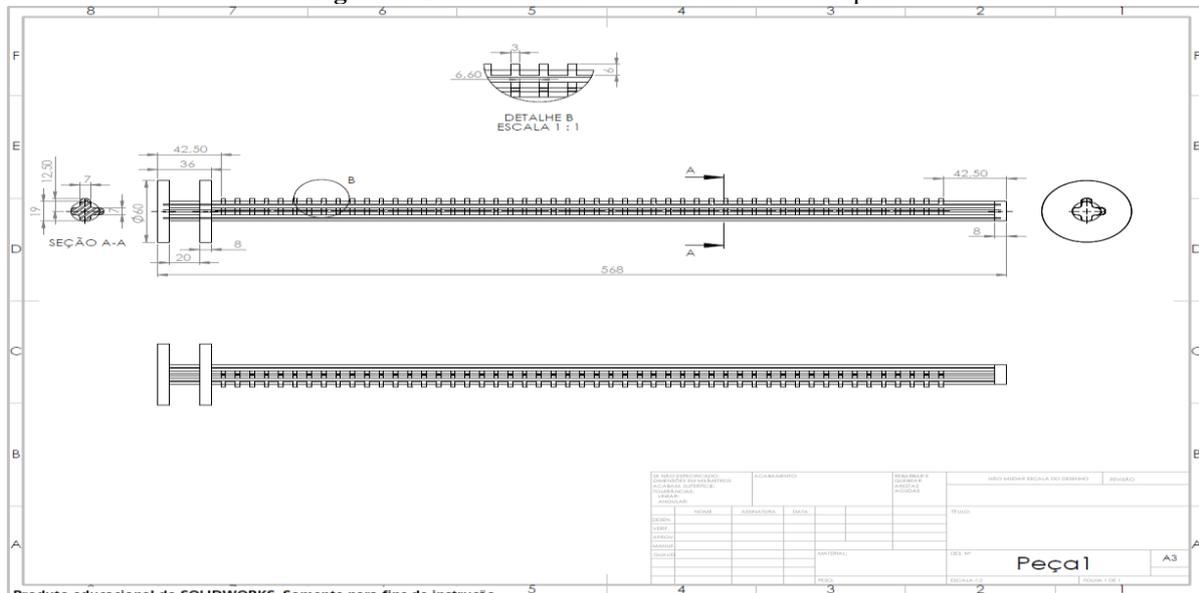
# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

- Temperatura máxima: 860 °C;
- Carga: Peso da peça mais pesada = 1 kg;
- Capacidade de carga: 50 peças;
- Carga máxima submetida: 50 kg.

Desta forma, pode-se concluir que a travessa de apoio é solicitada por esforços térmicos, devido à alta temperatura atingida pelo forno para o tratamento térmico, e por esforços mecânicos, devido a carga uniformemente distribuída sobre a peça

O varão de apoio possui dimensões conforme desenho técnica conforme figura 5:

**Figura 5.** Desenho técnico dimensional varão de apoio.



Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

Fonte: SolidWorks.

Primeiramente deve-se calcular os esforços aplicados no varão.

## Apresentação dos cálculos:

Para calcular o peso de cada peça sobre o varão em N/m, onde cada peça tem 1 kg, faz-se (considerando aceleração da gravidade como 9,81 m/s<sup>2</sup>):

$$\text{Peso} = 1 \text{ kg} \times 9,81 \rightarrow \text{força peso de cada peça} = 9,81 \text{ N}$$

Para o caso onde o varão é mais exigido, com uma carga de 50 peças, encontra-se a força equivalente (F<sub>eq</sub>):

$$F_{eq} = 9,81 \times 50 = 490,5 \text{ N}$$

Após a definição da força aplicada na peça, foi realizada uma simulação do computacional utilizando *software* de análise de elementos finitos (*SolidWorks*). Essa primeira simulação visa avaliar o comportamento do varão de apoio em suas condições atuais, sem qualquer alteração em sua geometria ou material de fabricação. Para fins de estudo, adicionou-se ao desenho dois suportes para que o varão de apoio seja fixado, com a intenção de deixar a



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

simulação o mais próximo do real, porém esses apoios não serão levados em consideração com relação ao estudo proposto.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vamos usar três critérios diferentes para selecionar o material mais adequado para fabricação do varão de apoio.

**Tensão de Von Mises.** No livro Resistência dos materiais, Russell C. Hibbeler define a tensão de Von Mises como: "Uma tensão escalar que pode ser usada para representar a tensão total em um ponto."

Essa tensão é baseada na teoria da energia de distorção máxima, que afirma que um material dúctil começa a escoar quando a energia de distorção por unidade de volume atinge um valor crítico. A energia de distorção é uma medida da deformação plástica que ocorre em um material. A tensão de Von Mises é calculada por:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)}$$

Onde:

- $\sigma_v$  é a tensão de von Mises
- $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as componentes principais da tensão

**Deslocamento resultante.** O deslocamento resultante é a soma de todos os deslocamentos de um ponto específico em uma peça. Ele é calculado como a soma dos deslocamentos nas três direções principais:

$$u_r = u_x + u_y + u_z$$

Onde:

- $u_r$  é o deslocamento resultante
- $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$  são os deslocamentos nas direções X, Y e Z

O deslocamento resultante pode ser usado para avaliar a deformação de uma peça. Também pode ser usado para identificar pontos de concentração de deslocamento. Os pontos de concentração de deslocamento são regiões onde os deslocamentos são significativamente maiores do que em outras regiões. Eles podem ser causados por uma variedade de fatores, incluindo mudanças na geometria, cargas concentradas e contato.

**Fator de segurança.** é uma medida da resistência de um componente a uma falha. Ele é calculado como a razão entre a tensão máxima calculada e a tensão de escoamento do material.

A tensão máxima é a tensão mais alta em um ponto específico em uma peça. Ela pode ser calculada usando um critério de falha, como a tensão de Von Mises, a tensão de cisalhamento máxima ou a tensão normal máxima.

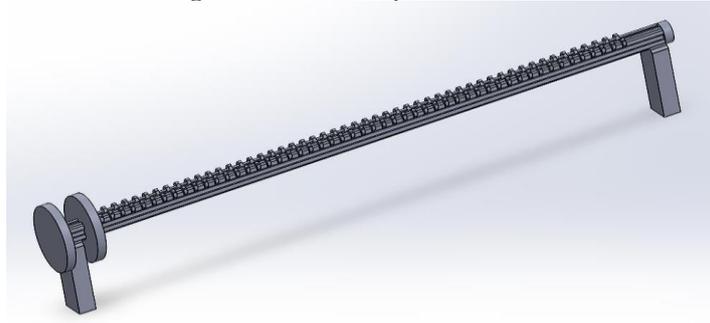
A tensão de escoamento é a tensão em que um material começa a deformar plasticamente. Ela é uma propriedade do material que é fornecida pelo fabricante.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Primeiro Estudo – Considerando as cargas externas força e temperatura, aço inoxidável martensítico 1.4021. A figura 6 mostra o varão de apoio modelado no *software SolidWorks*.

**Figura 6.** Varão de apoio modelado.



Fonte: SolidWorks

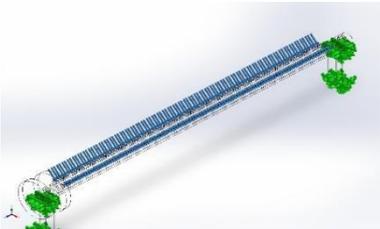
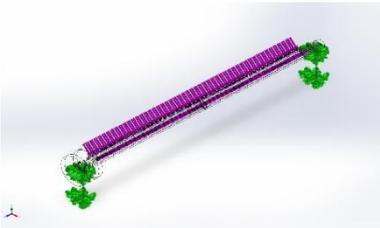
**Tabela 1.** Propriedades mecânicas do material.

### Propriedades mecânicas

<b>Nome:</b>	Aço inoxidável martensítico 1.4021 (X20Cr13)
<b>Tipo de modelo:</b>	Isotrópico linear elástico
<b>Critério de falha predeterminado:</b>	Tensão de von Mises máxima
<b>Limite de escoamento:</b>	6e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Resistência à tração:</b>	7,5e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico:</b>	2,15e+11 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0,28
<b>Massa específica:</b>	7.700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de cisalhamento:</b>	7,9e+10 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de expansão térmica:</b>	1,1e-05 /Kelvin

Fonte: SolidWorks.

**Tabela 2.** Cargas aplicadas.

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga	
Força-1		Entidades: Tipo: Valor:	100 face(s) Aplicar força normal 490,5 N
Temperatura-1		Entidades: Temperatura:	874 faces 860 Celsius

Fonte: SolidWorks

**Tabela 3.** Informações sobre o tipo de malha usada na simulação.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

## Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	6,00263 mm
Tamanho de elemento mínimo	0,956709 mm
Qualidade da malha	Alta
Refazer malha de peças falhas de maneira independente	Desativada

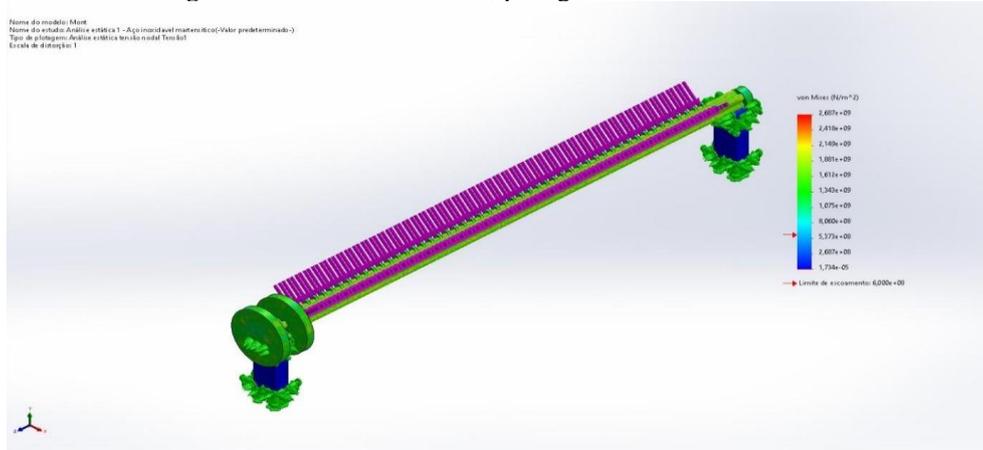
Fonte: SolidWorks.

**Tabela 4.** Mínimo e máximo tensão de Von Mises.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Tensão1	VON: tensão de von Mises	1,734e-05N/m <sup>2</sup> Nó: 207730	2,687e+09N/m <sup>2</sup> Nó: 2923

Fonte: SolidWorks.

**Figura 7.** Resultado do estudo, plotagem tensão de Von Mises.



Fonte: SolidWorks.

**Tabela 5.** Mínimo e máximo deslocamento resultante.

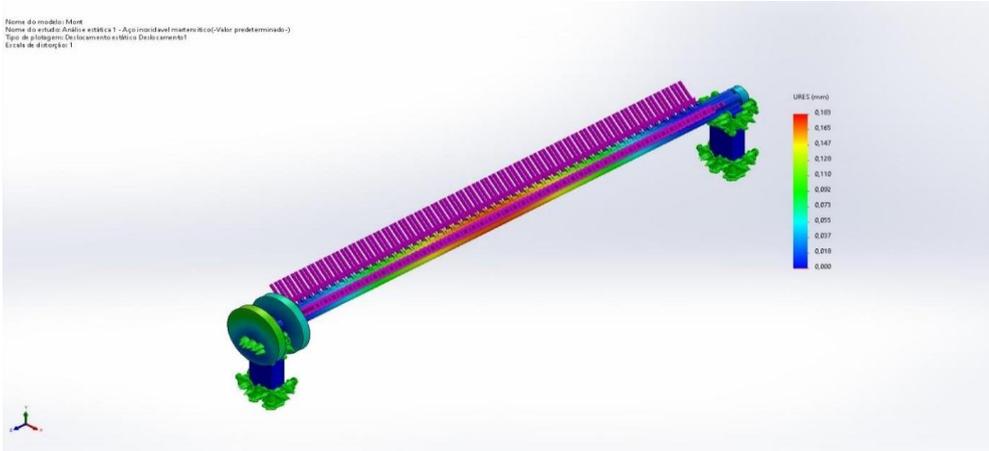
Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Deslocamento1	URES: Deslocamento resultante	0,000mm Nó: 204591	0,183mm Nó: 100195

Fonte: SolidWorks.

**Figura 8.** Resultado do estudo, plotagem deslocamento resultante.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO



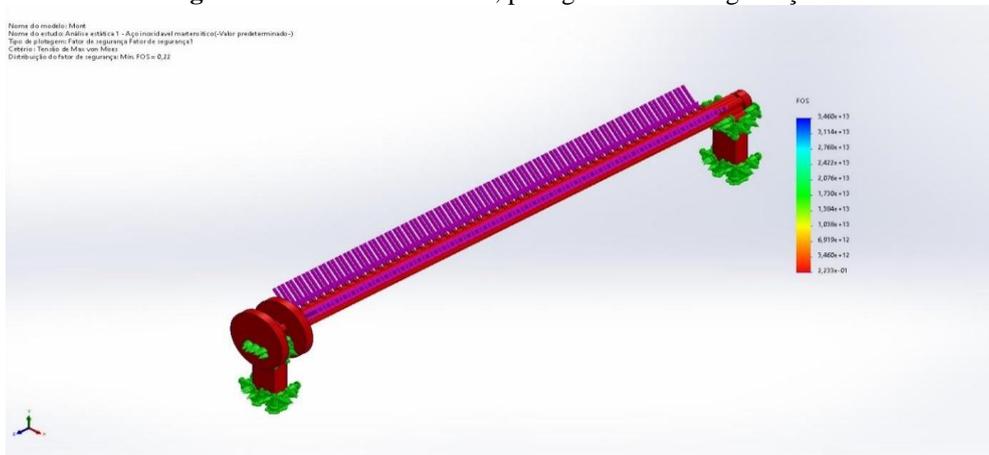
Fonte: SolidWorks.

**Tabela 6.** Fator de segurança.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Fator de segurança 1	Tensão de von Mises máxima	2,233e-01	3,460e+13
		Nó: 2923	Nó: 207730

Fonte: SolidWorks.

**Figura 9.** Resultado do estudo, plotagem fator de segurança.



Fonte: SolidWorks.

Nesse primeiro estudo realizado inseriu-se como cargas atuantes na peça a força de 490,5 N calculada anteriormente e a temperatura de 860°. Pode-se ver que a tensão de Von Mises máxima, chegou a 2,687e+09 N/m<sup>2</sup>, o limite de escoamento do material é de 6e+08 N/m<sup>2</sup> e o fator de segurança ficou em 0,22 mostrando que a peça irá falhar.

Para que o varão resista sem falhas as solicitações externas, o material de fabricação deve ter um limite de escoamento acima do valor máximo da tensão de Von Mises, um limite de escoamento acima do valor encontrado na simulação, é extremamente alto e está fora da faixa típica de ligas de aço convencionais, valores tão elevados de limite de escoamento podem ser necessários apenas em aplicações muito específicas, como em componentes de aeronaves espaciais, equipamentos de alta tecnologia ou em situações em que são necessárias propriedades mecânicas excepcionais que não é o caso da peça de estudo deste artigo.

Envolvendo comparações, foi feita a simulação retirando a temperatura e analisar novamente os dados.- A tabela 7 mostra....

# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Segundo estudo – temperatura desconsiderada, aço inoxidável martensítico 1.4021.

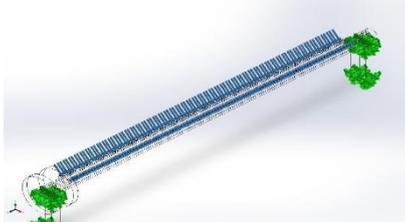
A Tabela 7 apresenta as propriedades mecânicas do material empregado nesta segunda fase da pesquisa, destacando que se trata do mesmo material utilizado na etapa anterior. O objetivo é analisar as respostas do varão de suporte ao remover a variável temperatura da simulação.

**Tabela 7.** Propriedades mecânicas do material.

Propriedades mecânicas	
<b>Nome:</b>	Aço inoxidável martensítico 1.4021 (X20Cr13)
<b>Tipo de modelo:</b>	Isotrópico linear elástico
<b>Critério de falha predeterminado:</b>	Tensão de von Mises máxima
<b>Limite de escoamento:</b>	6e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Resistência à tração:</b>	7,5e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico:</b>	2,15e+11 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0,28
<b>Massa específica:</b>	7.700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de cisalhamento:</b>	7,9e+10 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de expansão térmica:</b>	1,1e-05 /Kelvin

Fonte: SolidWorks.

**Tabela 8.** Cargas aplicadas.

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga	
Força-1		Entidades:	100 face(s)
		Tipo:	Aplicar força normal
		Valor:	490,5 N

Fonte: SolidWorks.

**Tabela 9.** Informações sobre o tipo de malha usada na simulação.

Informações de malha	
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	6,00263 mm
Tamanho de elemento mínimo	0,956709 mm
Qualidade da malha	Alta
Refazer malha de peças falhas de maneira independente	Desativada

Fonte: SolidWorks.

**Tabela 10.** Mínima e máxima tensão de Von Mises.

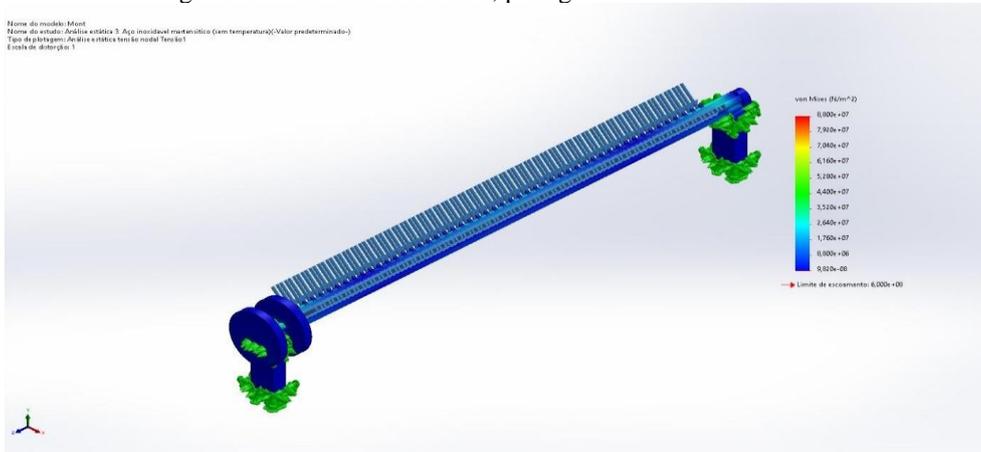
Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Tensão1	VON: tensão de von Mises	9,820e-08N/m <sup>2</sup> Nó: 211351	8,800e+07N/m <sup>2</sup> Nó: 179111

Fonte: SolidWorks.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 10. Resultado do estudo, plotagem tensão de Von Mises.



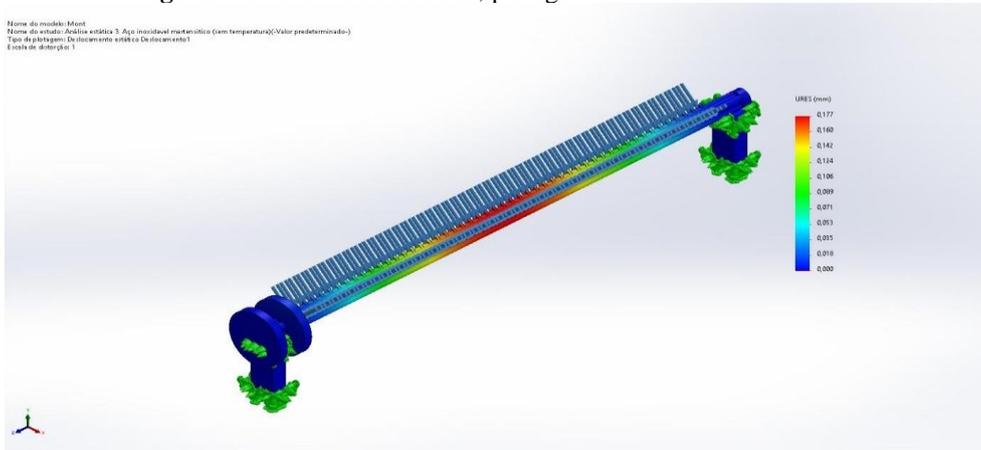
Fonte: SolidWorks

Tabela 11. Mínimo e máximo deslocamento resultante.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Deslocamento1	URES: Deslocamento resultante	0,000mm Nó: 204591	0,177mm Nó: 166859

Fonte: SolidWorks

Figura 11. Resultado do estudo, plotagem deslocamento resultante.



Fonte: SolidWorks.

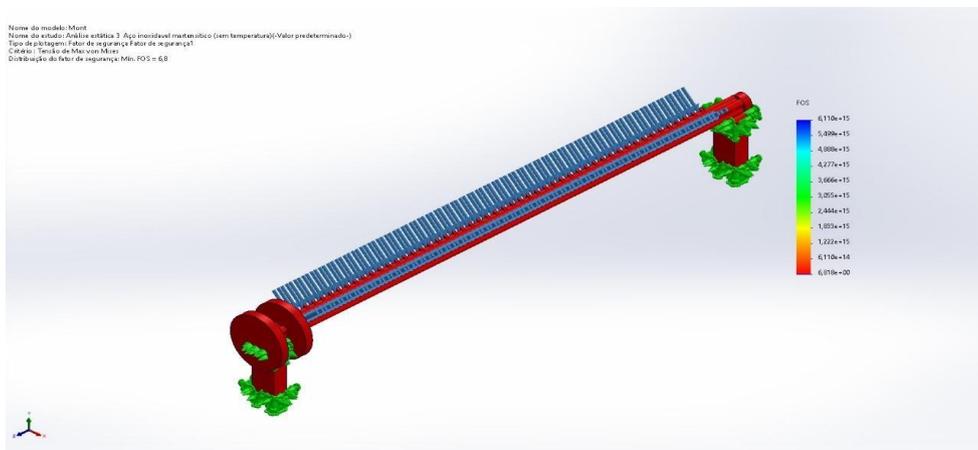
Tabela 12. Fator de segurança.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Fator de segurança1	Tensão de von Mises máxima	6,818e+00 Nó: 179111	6,110e+15 Nó: 211351

Fonte: SolidWorks.

Figura 12. Resultado do estudo, plotagem fator de segurança.

# TRABALHO DE GRADUAÇÃO



Fonte: SolidWorks

No segundo estudo conduzido, introduziu-se apenas a força de 490,5 N como carga atuante na peça. Observa-se uma redução da tensão de Von Mises para  $8,8e+07 \text{ N/m}^2$ . Em comparação com a tensão de escoamento do material, que é de  $6e+08 \text{ N/m}^2$ , nota-se que a tensão de Von Mises está abaixo do limite de escoamento do material, resultando em um fator de segurança de 6,8.

Ao analisar os resultados obtidos em ambas as simulações e compará-los, destaca-se que a remoção da variável temperatura, das simulações revela que o material suporta as cargas externas. No entanto, para otimizar o desempenho da peça, é imperativo buscar um material que apresente resistência superior em ambientes com elevadas temperaturas ao longo do tempo.

Introduz-se o conceito de fluência, um fenômeno associado à deformação plástica contínua em um material sujeito a uma carga constante ou elevadas temperaturas por períodos prolongados. A fluência torna-se relevante ao considerar a seleção de um material, uma vez que aqueles com boa resistência à fluência são mais propícios a atender às exigências da peça em questão.

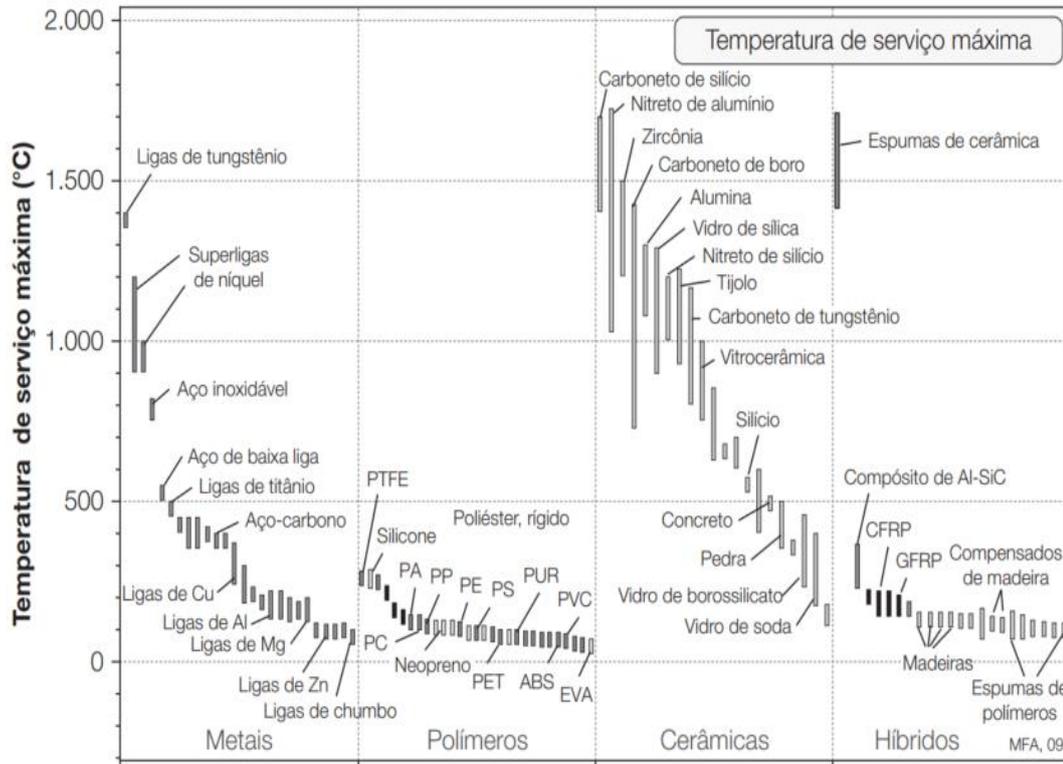
Pode-se afirmar que a variável temperatura é a carga externa mais crítica do nosso estudo, vamos utilizá-la como fator principal para selecionar o material mais adequado para construção do varão.

Na figura 13, mostra a classificação de alguns materiais de acordo com a temperatura máxima de serviço.

**Figura 13.** Temperatura de serviço máxima — a temperatura acima da qual um material torna-se inutilizável.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO



Fonte: Michael F. Ashby, em Seleção de Materiais no Projeto Mecânico (Quarta edição), 2011.

A peça em consideração está sujeita a uma temperatura de 860 °C. Analisando o gráfico, pode-se ver que, para materiais metálicos considerando a temperatura de 860 °C está entre aço inoxidável e superligas de níquel, porém essa temperatura está mais próxima da temperatura de serviço máxima das superligas de níquel, portanto, adotou-se essa classe de materiais para estudo.

As superligas de níquel são ligas metálicas que apresentam propriedades mecânicas e térmicas excepcionais. Elas são compostas principalmente de níquel, com a adição de outros elementos, como cromo, cobalto, molibdênio, titânio e alumínio.

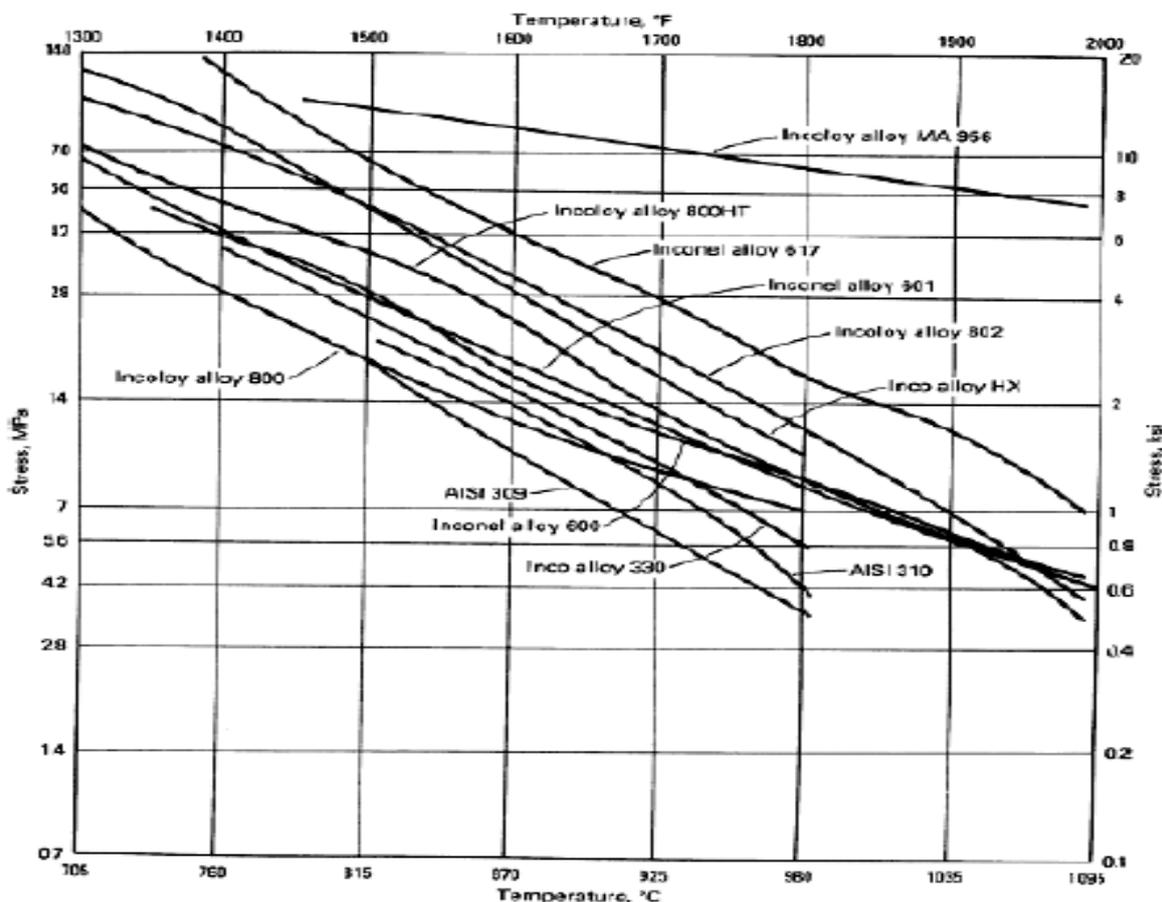
Existem vários tipos de superligas de níquel que são usadas em uma infinidade de aplicações na engenharia mecânica e na construção de máquinas.

Para auxiliar na escolha do melhor material de fabricação dentro da classe de superligas de níquel, utilizou-se como referência a figura 14, onde mostra teste de 10.000 horas de resistência a fluência em várias ligas e superligas de níquel.



## TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 14. Resistência à fluência em ligas e superligas de níquel.



Fonte: M. Eng. Alexandre Farina, em Metalografia das Ligas e Superligas de Níquel.

O gráfico que o teste de fluência foi realizado com base na temperatura e na tensão aplicada em vários tipos de ligas e superligas de níquel, quanto maior a temperatura, menor a tensão suportada pelo material. Para uma temperatura de 860° C temos algumas opções, porém a tensão de Von Mises encontrada na segunda simulação é de  $8,8e+07$  N/m<sup>2</sup>, a maior tensão mostrada no gráfico para a temperatura de 860° C é de  $8,0e+07$  N/m<sup>2</sup>. Para diminuir as tensões aplicadas no varão, foi proposto inserir um terceiro apoio no centro da peça, onde a tensão é maior, diminuindo assim a tensão máxima de Von Mises.

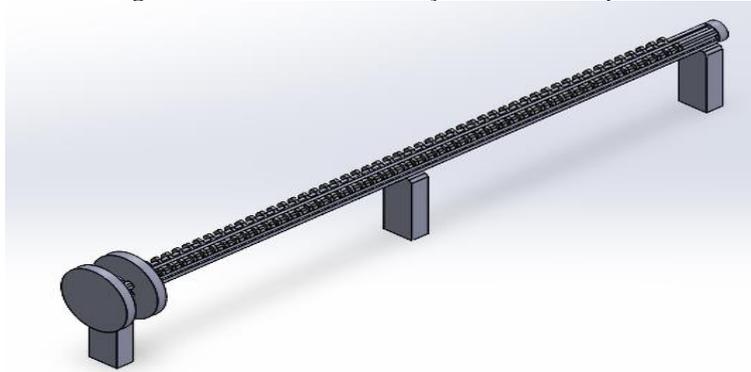
Terceiro estudo – temperatura desconsiderada e inserção do terceiro apoio, aço inoxidável martensítico 1.4021.

Para o terceiro estudo, vamos continuar usando o material, Aço inoxidável martensítico 1.4021 (X20Cr13), pois ainda não conseguimos definir qual superliga de níquel vamos usar, e para essa definição, utilizou-se o material original de fabricação como parâmetro. A figura 15 mostra o varão de apoio modelado no software SolidWorks com a inserção do terceiro apoio.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Figura 15.** Varão com a inserção do terceiro apoio.



Fonte: SolidWorks

**Tabela 13.** Propriedades mecânicas do material.

Propriedades mecânicas	
<b>Nome:</b>	Aço inoxidável martensítico 1.4021 (X20Cr13)
<b>Tipo de modelo:</b>	Isotrópico linear elástico
<b>Critério de falha predeterminado:</b>	Tensão de von Mises máxima
<b>Limite de escoamento:</b>	6e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Resistência à tração:</b>	7,5e+08 N/m <sup>2</sup>
<b>Módulo elástico:</b>	2,15e+11 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0,28
<b>Massa específica:</b>	7.700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de cisalhamento:</b>	7,9e+10 N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de expansão térmica:</b>	1,1e-05 /Kelvin

Fonte: SolidWorks

**Tabela 14.** Cargas aplicadas.

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga	
Força-1		Entidades:	100 face(s)
		Tipo:	Aplicar força normal
		Valor:	490,5 N

Fonte: SolidWorks

**Tabela 15.** Informações sobre o tipo de malha usada na simulação.

Informações de malha	
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	6,00263 mm
Tamanho de elemento mínimo	0,956709 mm
Qualidade da malha	Alta



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Refazer malha de peças falhas de maneira independente Desativada

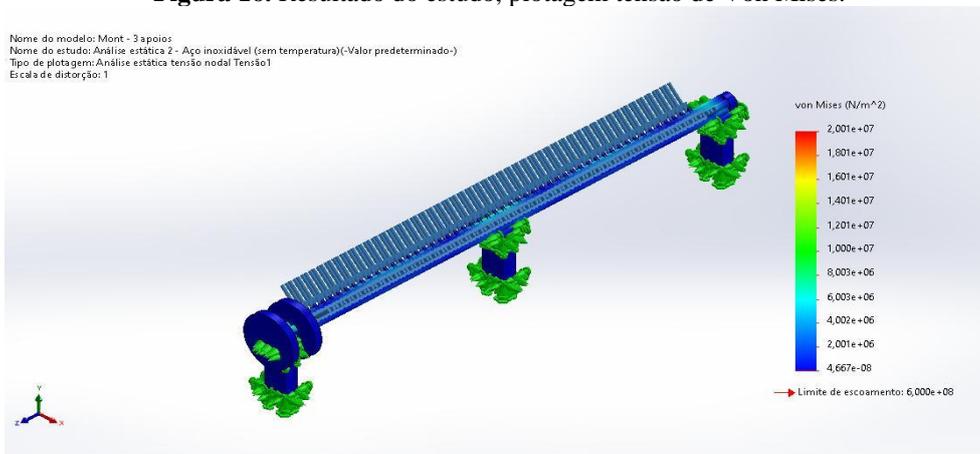
Fonte: SolidWorks

**Tabela 16.** Mínimo e máximo tensão de Von Mises.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Tensão1	VON: tensão de von Mises	4,667e-08N/m <sup>2</sup> Nó: 211351	2,001e+07N/m <sup>2</sup> Nó: 179111

Fonte: SolidWorks

**Figura 16.** Resultado do estudo, plotagem tensão de Von Mises.



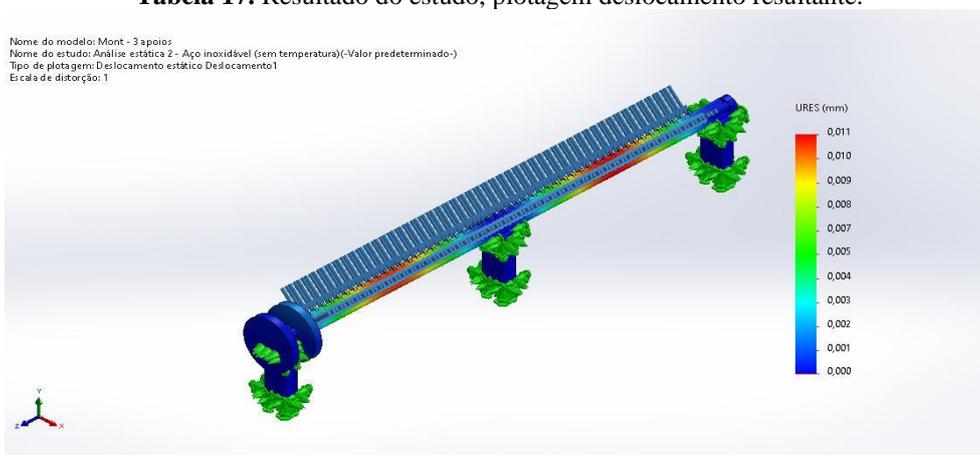
Fonte: SolidWorks

**Figura 17.** Mínimo e máximo deslocamento resultante

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Deslocamento1	URES: Deslocamento resultante	0,000mm Nó: 204591	0,011mm Nó: 173325

Fonte: SolidWorks

**Tabela 17.** Resultado do estudo, plotagem deslocamento resultante.



Fonte: SolidWorks.



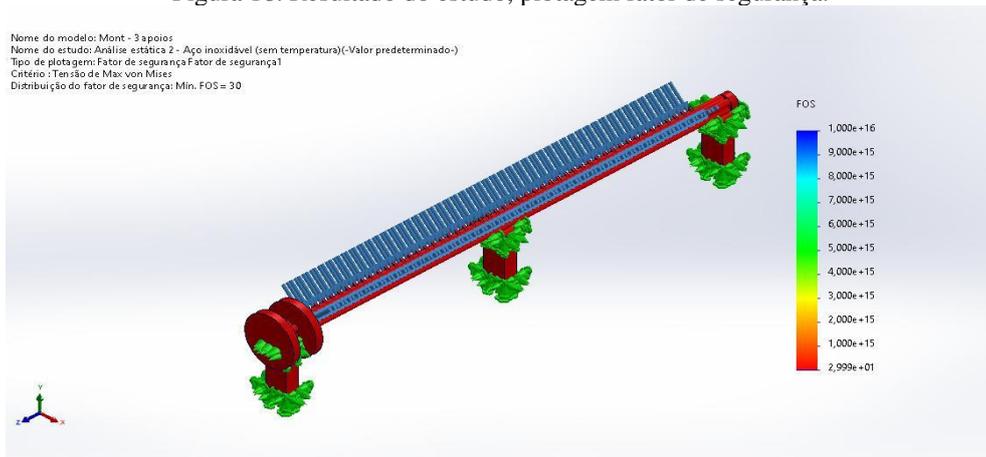
# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Tabela 18. Mínimo e máximo fator de segurança.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Fator de segurança1	Tensão de von Mises máxima	2,999e+01 Nó: 179111	1,000e+16 Nó: 211351

Fonte: SolidWorks.

Figura 18. Resultado do estudo, plotagem fator de segurança.



Fonte: SolidWorks

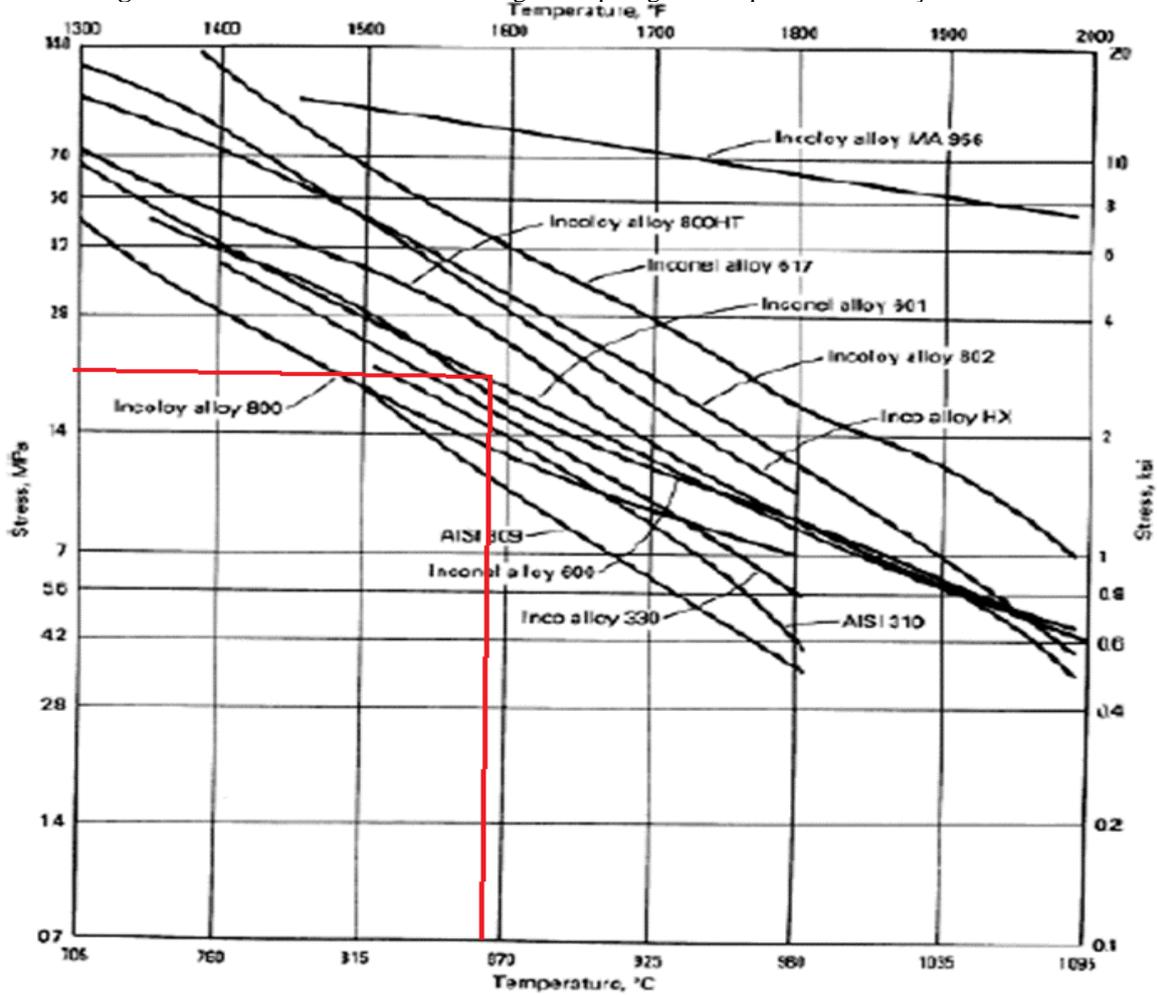
Ao analisarmos os resultados da simulação, notamos que a tensão de Von Mises atinge  $2,001e+07 \text{ N/m}^2$ , apresentando uma redução significativa em comparação com a simulação realizada com apenas dois apoios. Com base nesse novo valor de tensão de Von Mises, procedemos à seleção de uma superliga apropriada para a utilização nesta peça, consultando o gráfico de Resistência à Fluência em Ligas e Superligas de Níquel.

A Figura 19 mostra o gráfico e ilustra esse processo de seleção, no qual, considerando a tensão máxima de Von Mises de  $2e+07 \text{ N/m}^2$  obtida neste terceiro estudo e a temperatura de  $860^\circ\text{C}$ , o gráfico indica que o material mais adequado para essa situação é a superliga de níquel Inconel 601.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Figura 19.** Resistência à fluência em ligas e superligas de níquel com indicação do material.



Fonte: M. Eng. Alexandre Farina, em Metalografia das Ligas e Superligas de Níquel.

Quarto estudo – temperatura desconsiderada e inserção do terceiro apoio, superliga de níquel inconel 601.

Nesse estudo, executou-se uma simulação usando o novo material selecionado no estudo anterior, conforme podemos ver na tabela 19.

**Tabela 19.** Propriedades mecânicas do material.

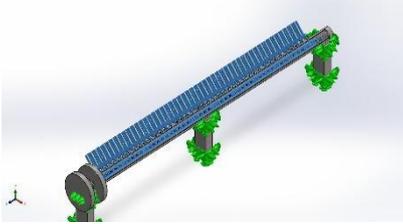
Propriedades mecânicas	
Nome:	Liga de níquel-cromo-cobalto Inconel 601
Tipo de modelo:	Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado:	Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento:	4e+08 N/m <sup>2</sup>
Resistência à tração:	8,5e+08 N/m <sup>2</sup>
Módulo elástico:	2,1e+11 N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson:	0,34
Massa específica:	8.130 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de cisalhamento:	8,2e+10 N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica:	1,45e-05 /Kelvin

Fonte: SolidWorks.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Tabela 20.** Cargas aplicadas.

Nome da carga	Imagem	Detalhes de carga	
Força-1		Entidades: Tipo: Valor:	100 face(s) Aplicar força normal 490,5 N

Fonte: SolidWorks.

**Tabela 21.** Informações sobre o tipo de malha usada na simulação.

### Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha mesclada com base em curvatura
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos
Tamanho máximo de elemento	6,00263 mm
Tamanho de elemento mínimo	0,956709 mm
Qualidade da malha	Alta
Refazer malha de peças falhas de maneira independente	Desativada

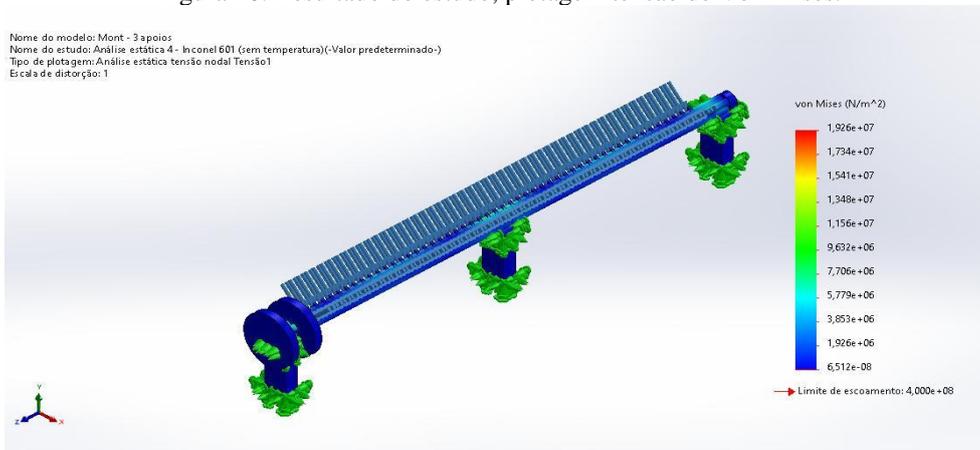
Fonte: SolidWorks.

**Tabela 22.** Mínima e máxima tensão de Von Mises.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Tensão1	VON: tensão de von Mises	6,512e-08N/m <sup>2</sup> Nó: 214833	1,926e+07N/m <sup>2</sup> Nó: 179111

Fonte: SolidWorks.

**Figura 20.** Resultado do estudo, plotagem tensão de Von Mises.



Fonte: SolidWorks



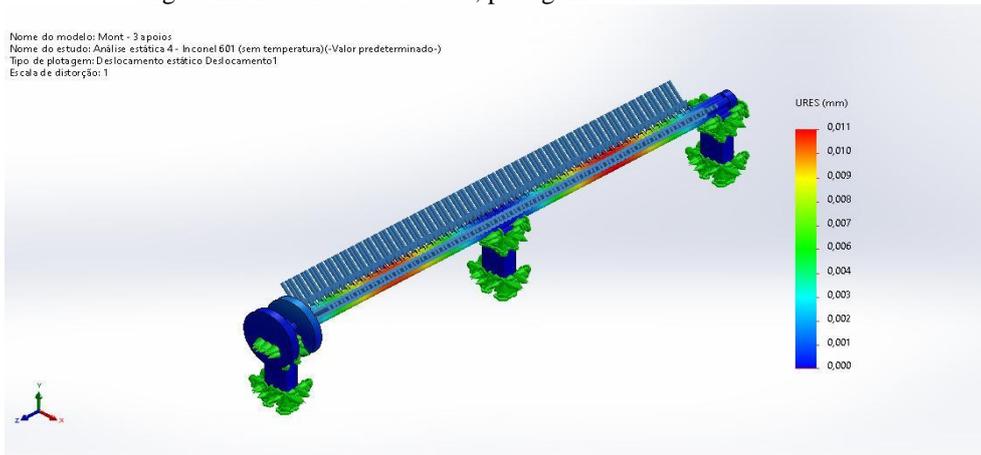
# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Tabela 23.** Mínima e máximo deslocamento resultante.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Deslocamento1	URES: Deslocamento resultante	0,000mm Nó: 204591	0,011mm Nó: 96842

Fonte: SolidWorks

**Figura 21.** Resultado do estudo, plotagem deslocamento resultante.



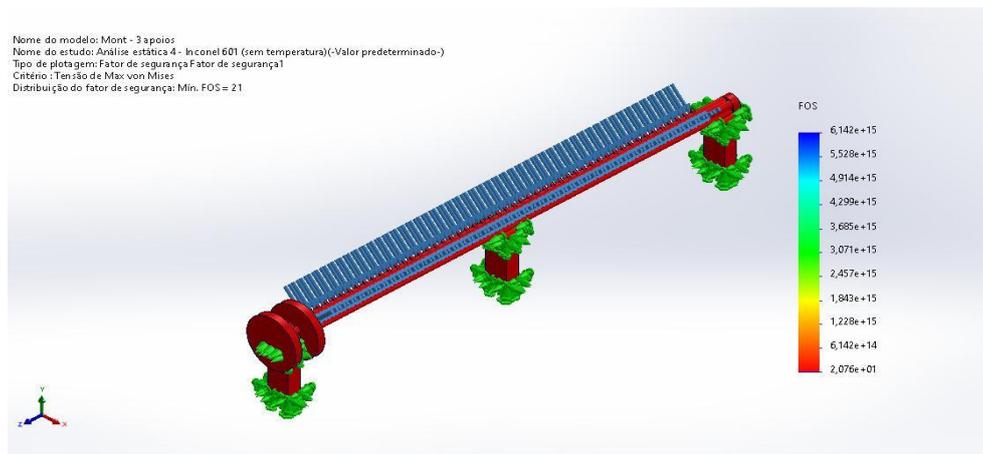
Fonte: SolidWorks

**Tabela 24.** Fator de segurança.

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Fator de segurança1	Tensão de von Mises máxima	2,076e+01 Nó: 179111	6,142e+15 Nó: 214833

Fonte: SolidWorks

**Figura 22.** Resultado do estudo, plotagem fator de segurança.



Fonte: SolidWorks

## CONCLUSÃO

Ao analisar os quatro estudos efetuados, pode-se observar que o fator temperatura foi de maior impacto nas propriedades mecânicas da peça em questão, na tabela xx, pode-se comparar os dados coletados.



# TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Tabela 25. Comparação de resultados obtidos nas simulações.

	Aço inoxidável com 2 apoios considerando temperatura e tensão	Aço inoxidável com 2 apoios desconsiderando temperatura	Aço inoxidável com 3 apoios desconsiderando temperatura	Inconel 601 com 3 apoios desconsiderando temperatura
<b>Tensão de escoamento (N/m<sup>2</sup>)</b>	6,000e+08	6,000e+08	6,000e+08	4,000e+08
<b>Tensão de Von Mises máxima (N/m<sup>2</sup>)</b>	2,687e+09	8,800e+07	2,001e+07	1,926e+07
<b>Deslocamento máximo (mm)</b>	0,183	0,177	0,011	0,011
<b>Fator de segurança</b>	0,22	6	30	21

Fonte: Próprio autor.

A análise dos dados coletados revelou que a elevação da temperatura resultou em uma tensão de Von Mises superior à tensão de escoamento do material. Diante dessa constatação, identificou-se a importância de excluir a variável temperatura da simulação, visando obter dados mais precisos para orientar a seleção do material adequado.

A utilização da figura 13, que representa a temperatura de serviço máxima de várias ligas, direcionou a escolha para o grupo de materiais conhecido como superliga de níquel. Essa categoria apresentou uma temperatura de serviço máxima superior à exigida para a aplicação em questão. Posteriormente, ao analisar a figura 14, referente à resistência à fluência em ligas e superligas de níquel, identificou-se uma tensão máxima de  $8,0e+07$  N/m<sup>2</sup> para a temperatura de 860°C, usando a máxima tensão de Von Mises de  $8,8e+07$  N/m<sup>2</sup> encontrada no segundo, como parâmetro, observou-se uma tensão relativamente alta, com isso verificamos a necessidade de diminuir essas tensões.

Com o intuito de otimizar a escolha do material e diminuir as tensões, foi introduzido um apoio adicional no centro da peça, onde as deformações eram mais acentuadas. Essa modificação resultou em uma significativa redução da tensão de Von Mises, possibilitando a seleção da superliga de níquel Inconel 601, conforme indicado no gráfico 3.

Ao avaliar, minuciosamente, os resultados das simulações, não identificou-se pontos de concentração de tensão que justificassem alterações na geometria da peça. Como conclusão, recomenda-se a substituição do material de fabricação para a superliga de níquel Inconel 601 e a inclusão de um terceiro apoio no centro da peça, visando aprimorar seu desempenho de maneira significativa.

## REFERÊNCIAS

MICHAEL F. Ashby, em Seleção de Materiais no Projeto Mecânico. Quarta edição, 2011;

M. Eng. Alexandre Farina, em Metalografia das Ligas e Superligas de Níquel;

Inconel 601. Disponível em: <<https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/inconel-601/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

C. HIBBELER, Russell, em Resistência dos Materiais. Sétima edição. 26 out. 2009.