

**Simulação numérica de vigas de aço inoxidável sob incêndio e temperaturas elevadas**

**Andre Luiz Zanoni**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Tecnologia e Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica No contexto da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientada por

**Professor Doutor Paulo Piloto**

**Professor Doutor Luís Mesquita**

**Professor Doutor Diego Rossetto**

Bragança

2025

## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não seria possível sem o apoio de muitas pessoas as quais expresso minha profunda gratidão:

Primeiramente agradecer a meus pais que me possibilitaram toda essa experiência tanto pessoal quanto profissional, que me deram suporte a todo momento, em todo tipo de situação e que sempre acreditaram em mim. Aos meus avós Alcides e Diva por todo o amor. Aos meus primos Lucas, Fabíola, Rodrigo e Luan que me apoiaram muito durante toda minha jornada.

Ao meu orientador, Paulo Piloto, pelos ensinamentos e pela exigência que me motivou a buscar o melhor resultado possível. Aos meus coorientadores, Luís Mesquita e Diego Rossetto, pelo compartilhamento de conhecimento e pelo apoio essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Charuto que foi um irmão para mim durante a graduação, sempre apoiando e dando ótimas risadas juntos. Aos meus amigos Luan, Breno e Laura que sempre estiveram juntos para muitas risadas e comilanças. A Ana por me aguentar, suportar, ajudar e todos os momentos passados no AP IDF.

Em especial a Júlia. Obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos, pelos conselhos, pela paciência e pelo apoio incondicional. Sua cobrança carinhosa me manteve focado, e seu encorajamento me deu forças nos dias mais difíceis, tornando tudo mais leve de suportar. Este trabalho é um reflexo do quanto você acreditou em mim.

Agradeço à UTFPR pela oportunidade do duplo diploma e pela base da minha formação. Ao IPB, pela acolhida e pelo suporte durante essa etapa tão importante da minha vida.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

Incêndios em áreas urbanas representam um risco significativo à vida humana, destacando a importância de analisar a resistência estrutural em altas temperaturas para prevenir colapsos. O aço inoxidável, amplamente utilizado em edificações por sua durabilidade e resistência à corrosão, pode apresentar colapso sob calor intenso. Para prever seu comportamento em situações de incêndio, a simulação numérica, especialmente o método dos elementos finitos (FEM), é uma ferramenta essencial. Este estudo utiliza o programa ANSYS para modelar as alterações nas propriedades mecânicas do aço inoxidável em altas temperaturas, contribuindo para o aprimoramento da segurança estrutural. A partir dos ensaios realizados nas amostras B1-B6 descritas por Fan et al. (2016), foram obtidos resultados da capacidade portante, resultados do campo de temperatura e resultados do tempo de resistência ao fogo. Na análise da capacidade portante, o gráfico de força versus deslocamento mostrou alta precisão do modelo numérico em comparação com o modelo experimental, com um erro médio inferior a 4%. Na validação térmica, as curvas numéricas apresentaram valores superiores aos experimentais devido a diferenças no isolamento térmico e na aplicação das condições fronteira em relação às condições reais dos ensaios. Para a validação do tempo de resistência (análise termomecânica), a curva de deslocamento em função do tempo revelou diferenças significativas nas amostras B3 à B6, atribuídas às discrepâncias térmicas previamente demonstradas. A amostra B2 mostrou boa aproximação com os resultados experimentais. Todas as amostras falharam por flexão no plano devido à presença de enrijecedores. No estudo paramétrico, foi analisada a influência das dimensões geométricas e dos subtipos de materiais na capacidade resistente das vigas em aço inoxidável. O aço austenítico 1.4301 apresentou a menor resistência, enquanto o duplex 1.4462 demonstrou possuir maior capacidade, embora com menor ductilidade. Nas análises térmicas, os materiais austeníticos e duplex tiveram comportamento semelhante, enquanto o ferrítico exibiu maior condução de calor. A espessura e a largura influenciaram mais a distribuição de temperatura do que a altura. Nas análises termomecânicas, foram aplicados níveis de carga de 0.2, 0.4 e 0.6 da carga máxima para avaliar o tempo de resistência ao fogo e a temperatura crítica de resistência das vigas. O aço austenítico 1.4571 apresentou a maior resistência, devido ao alto teor de níquel, enquanto o ferrítico 1.4016 mostrou menor desempenho (mais parecido com aço ao carbono). Os resultados destacam que a escolha do material e das dimensões geométricas influenciam diretamente a resistência ao fogo das vigas de aço inoxidável sob condições de incêndio, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais seguras e eficientes.

**Palavras-chave:** Fogo; Aço inoxidável; Simulação numérica; Resistência ao fogo; Método dos elementos finitos (FEM).

## ABSTRACT

Fires in urban areas represent a significant risk to human life, highlighting the importance of analysing structural resistance at high temperatures to prevent collapse. Stainless steel, widely used in buildings for its durability and resistance to corrosion, can show failure under intense heat. To predict its behaviour in fire situations, numerical simulation, especially the finite element method (FEM), is an essential tool. This study uses ANSYS software to model the changes in the mechanical properties of stainless steel at high temperatures, helping to improve structural safety. From the analysis of samples B1-B6 described by Fan et al. (2016), the load-bearing was determined, the temperature field was defined and the fire resistance was established. In the load-bearing analysis, the force versus displacement graph showed a high accuracy of the numerical model compared to the experimental test, with an average error of less than 4%. In the temperature validation, the numerical curves showed higher temperature values than the experimental ones, probably due to differences in thermal insulation on the top of the beams. For the fire resistance validation, the displacement curve as a function of time revealed significant differences in samples B3 to B6, attributed to thermal discrepancies, mentioned before, while sample B2 showed good approximation with the experimental results. All the samples failed in-plane bending due to the presence of stiffeners. In the parametric study, the influence of geometric dimensions and materials on the strength of the beams was analysed. Austenitic steel 1.4301 showed the lowest load-bearing capacity, while duplex 1.4462 showed the highest, albeit with lower ductility. In the thermal analyses, the austenitic and duplex materials behaved similarly, while the ferritic exhibited greater heat conduction (similar to carbon steel). The thickness and width influenced temperature distribution more than height. In the thermomechanical analyses, load levels of 0.2, 0.4 and 0.6 of the load-bearing capacity were applied to evaluate the final time and “critical temperature” of the beams. The austenitic steel 1.4571 showed the greatest fire resistance time due to its high nickel content, while ferritic 1.4016 showed the lowest performance. The results show that the choice of material and geometric dimensions has a direct impact on the fire resistance of stainless steel beams, contributing to the development of safer and more efficient structures.

**Keywords:** Fire; Stainless steel; Numerical simulation; Thermomechanical strength; Finite element method (FEM).

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compilação de estudos realizados com diferentes seções de vigas utilizando diversos <i>softwares</i> de análises estrutural. ....	22
Tabela 2 – Propriedades mecânicas média à temperatura ambiente do material (Adaptado de Fan <i>et al.</i> , 2016). ....	24
Tabela 3 - Resultados experimentais de ensaios experimentais de vigas com fogo, (Adaptado de Fan <i>et al.</i> , 2016). ....	26
Tabela 4 – Tipos de aço inoxidável e suas características específicas (Adaptado de CEN 2006). ....	27
Tabela 5 – Seções transversais das vigas (Adaptado de Millstock Stainless, 2015). ....	27
Tabela 6 - Comparação entre os resultados estáticos experimental e numérico. ....	45
Tabela 7 - Tabela do RMSE para os valores térmicos ao longo do tempo experimentais e numéricos. ....	48
Tabela 8 - Tabela do RMSE para os valores de deslocamento máximo no eixo y ao longo do tempo experimentais e numéricos. ....	49
Tabela 9 - Força máxima e deslocamento à temperatura ambiente suportada por cada seção transversal de viga nos diferentes aços inoxidáveis. ....	52
Tabela 10 - Tempo final (resistência ao fogo) e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas. ....	57
Tabela 11 - Tempo final e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas. ....	58
Tabela 12 - Tempo final e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas. ....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo do fogo. ....	15
Figura 2 – Fator de redução de força (Ellobody, 2012). ....	17
Figura 3 – Fator de redução de rigidez (Ellobody, 2012). ....	17
Figura 4 – Diferentes tipos de viga: (1) RHS, (2) SHS, (3) I, (4) H, (5) UPN e (6) T, (Adaptado de Millstock Stainless, 2015). ....	18
Figura 5 - Fluxograma de modelagem computacional por MEF (Adaptado de Hecke, 2010). ....	21
Figura 6 – Dimensão da viga experimental (Adaptado de Fan <i>et al.</i> , 2016). ....	24
Figura 7 – Dimensões das seções transversais das vigas (Adaptado de Millstock Stainless, 2015). ....	28
Figura 8 - Gráfico das propriedades térmicas dos aços inoxidáveis. ....	31
Figura 9 - Gráfico da curva padrão do fogo ISO834. ....	32
Figura 10 - Geometria do elemento SHELL 181 (ANSYS, Inc., 2024). ....	34
Figura 11 – Áreas formadas no modelo geométrico. ....	36
Figura 12 - Divisões de linha para criação das malhas. ....	36
Figura 13 - Divisões das linhas para malha na seção. ....	37
Figura 14 - Modelo geométrico. ....	38
Figura 15 - Condições de contorno do modelo geométrico. ....	39
Figura 16 - Representação dos limites de convecção e radiação na viga. ....	42
Figura 17 - Gráfico da análise numérica estática da força em função do deslocamento. ....	45
Figura 18 - Pontos de obtenção da temperatura na seção transversal (Fonte: Fan <i>et al.</i> 2016). ....	46
Figura 19 - Comparação numérica com experimental das curvas de temperaturas nos quatro pontos das seções em função do tempo das amostras: (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4, (e) B5 e (f) B6. ....	47
Figura 20 - Gráfico comparando as simulações termomecânicas com os dados experimentais. ....	49
Figura 21 - Comparação da resistência à temperatura ambiente das seções transversais para cada material a) austenítico 1.4301, b) ferrítico 1.4016, c) austenítico 1.4571 e d) duplex 1.4462. ....	50
Figura 22 - Dados térmicos seção RHS180x100x5 entre os materiais a) austenítico 1.4301 b) ferrítico 1.4016 c) austenítico 1.4571 d) duplex 1.4462. ....	53
Figura 23 – Comparação dos pontos T1, T2, T3 e T4 entre os materiais austenítico 1.4103 e ferrítico 1.4016 da seção RHS 180x100x5. ....	54
Figura 24 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 200x100x5 e RHS 180x100x5, aço austenítico 1.4301. ....	54
Figura 25 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 150x100x5 e RHS 150x80x5, aço austenítico 1.4301. ....	55
Figura 26 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 150x100x5 e RHS 150x80x5, aço austenítico 1.4301. ....	56
Figura 27 - Gráfico do tempo de simulação do ANSYS em função do nível de carregamento: (a)100x50x5, (b)150x80x5, (c)150x100x5, (d)180x100x5, (e)200x100x5, (f)300x200x5 e (g)300x200x8. ....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\dot{h}_c$	Convecção do fluxo de calor
$\dot{h}_r$	Radiação do fluxo de calor
$\frac{\Delta l}{l}$	Expansão térmica
$\dot{h}$	Fluxo de calor
$M_{c,y,Rd}$	Capacidade de flexão da viga à 20 °C
$M_{max}$	Momento máximo
$T_g$	Temperatura do gás
$T_m$	Temperatura da superfície do material
$\bar{b}$	Distância entre apoios da viga
$c_a$	Calor específico
$\frac{dD}{dt}$	Taxa do deslocamento no tempo do ponto médio da amostra no teste de fogo
$k_\sigma$	Fator de flambagem correspondente a taxa de tensão $\Psi$
$\alpha_c$	Coefficiente de fluxo de calor por convecção
$\lambda_a$	Condutividade térmica
$\lambda_{p,\theta}$	Esbelteza relativa a temperaturas elevadas
$\lambda_{p0,\theta}$	Esbelteza relativa para classificação da seção
$\xi_\theta$	Fator de temperatura elevada
$\rho_a$	Densidade
3D	Tridimensional
b	Largura da seção transversal
CHS	Seção circular oca
d	Altura da seção transversal da amostra
D	Deslocamento no eixo y no ponto médio
$E_0$	Módulo de elasticidade
$E_{a,\theta}$	Inclinação da faixa elástica linear na temperatura $\theta_a$
$E_{p0,2,\theta}$	Módulo tangente em $f_{p0,2,\theta}$
$f_{2,\theta}$	Resistência a 2% de deformação total na temperatura $\theta_a$
FEM	Método dos elementos finitos
$f_{p0,2,\theta}$	Resistência à prova de 0,2% à temperatura $\theta_a$
$f_{u,\theta}$	Tensão última à temperatura $\theta_a$

h	Altura da seção transversal
L	Comprimento efetivo da amostra
MDF	Método das diferenças finitas
MFV	Método dos volumes finitos
$n_{\theta}/m_{\theta}$	Expoentes que definem o grau de não linearidade do material na temperatura $\theta_a$
RHS	Seção retangular oca
$r_i$	Raio interno da seção transversal
SHS	Seção quadrada oca
SR	Seção retangular
T	Temperatura
t	tempo/espessura da seção
VC	Volume de controle
$\varepsilon_f$	Emissividade do fogo
$\varepsilon_{fi}$	Parâmetro do material dependendo da tensão de escoamento para a situação de incêndio
$\varepsilon_m$	Coefficiente de emissividade
$\varepsilon_{p0,2,\theta}$	Deformação correspondente à tensão $f_{p0,2,\theta}$
$\varepsilon_{t0,2}$	Deformação de $\sigma_{0,2}$
$\varepsilon_u$	Deformação última
$\varepsilon_{u,\theta}$	Deformação à tensão $f_{u,\theta}$
$\varepsilon_{\theta}$	Deformação à temperatura $\theta_a$
$\theta_a$	Temperatura
$\sigma$	Constante de Stephan Boltzmann
$\sigma_{0,01}$	Tensão correspondente a 0,01% da deformação residual
$\sigma_{0,2}$	Tensão de escoamento
$\sigma_{0,2,c}$	Tensão de escoamento do <i>corner</i>
$\sigma_{0,2,v}$	Tensão de escoamento da superfície plana
$\sigma_u$	Tensão última
$\sigma_{u,c}$	Tensão última do <i>corner</i>
$\sigma_{u,v}$	Tensão última da superfície plana
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\sigma_{\theta}$	Tensão à temperatura $\theta_a$
$\Psi$	Taxa de tensão
$\Phi$	Fator de configuração

*n* Nivel de carga

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1. Cenário de incêndio .....	15
3.2. Aço inoxidável.....	16
3.3. Vigas de seção retangular oca (RHS).....	18
3.4. Simulações Numéricas.....	19
3.4.1. ANSYS.....	20
3.5. Trabalhos Relacionados – Aplicações .....	21
4. MATERIAIS .....	23
4.1. Propriedades Mecânicas .....	23
4.1.1. Base de dados .....	23
4.1.2. Materiais utilizados no estudo paramétrico .....	27
4.2. Propriedades Térmicas .....	30
5. MÉTODOS DE ANÁLISE .....	33
5.1. Simulação .....	34
5.1.1. Análise estática (capacidade resistente à temperatura ambiente) .....	35
5.1.1.1. <i>PreProcessor</i> .....	35
5.1.1.2. <i>Solution</i> .....	39
5.1.1.3. <i>PostProcessor</i> .....	40
5.1.2. Análise Térmica .....	40
5.1.2.1. <i>PreProcessor</i> .....	40
5.1.2.2. <i>Solution</i> .....	42
5.1.2.3. <i>PostProcessor</i> .....	43
5.1.3. Análise Termomecânica .....	43
5.1.3.1. <i>PreProcessor</i> .....	43
5.1.3.2. <i>Solution</i> .....	44
5.1.3.3. <i>PostProcessor</i> .....	44
6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	45
6.1. Validação numérica .....	45
6.2. Estudo Paramétrico .....	50
7. CONCLUSÕES .....	61

<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>155</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Incêndios representam uma ameaça constante em áreas urbanas, podendo ocorrer em diferentes tipos de estruturas, e resultam em significativas perdas humanas anualmente, com uma taxa de mortalidade estimada entre 10 e 20 indivíduos por milhão de habitantes (Reis, 2011). Esses eventos são causados por uma reação química exotérmica conhecida como combustão, na qual a interação entre combustível, comburente e uma fonte de energia liberta grandes quantidades de luz e calor, causando danos severos às edificações e colocando em risco a vida das pessoas (Figueiredo, 2018).

Diante disso, surgiu um crescente interesse em estudar estruturas metálicas, com foco no desenvolvimento de métodos para avaliar o comportamento estrutural em situações de incêndio. A análise da resistência das estruturas sob altas temperaturas, como as observadas em incêndios, é crucial para prevenir o colapso prematuro do edifício, o que poderia comprometer a evacuação dos ocupantes e dificultar o acesso das equipes de combate ao fogo. Esse cenário aumenta significativamente o risco de propagação do fogo, calor e/ou fumaça tanto dentro do edifício quanto nas áreas adjacentes (Landesmann & Mouço, 2007).

Nos últimos anos, o uso de aço inoxidável em edifícios tem aumentado devido às suas propriedades anticorrosivas e longa durabilidade. Classificado em cinco grupos distintos, os aços ferríticos, austenítico e austenítico-ferríticos (Duplex) destacam-se por seu menor custo, resultante da menor porcentagem de níquel, mantendo resistência comparável, ou até maior, ao aço carbono e boa resistência à corrosão (Rossi, 2014).

No entanto, em situações de incêndio, o aço inoxidável pode apresentar modos de falha como todos os restantes aços ao carbono, comportamento mecânico não linear devido à sua alta condutividade térmica, que acelera a degradação de suas propriedades mecânicas (Cardoso, 2019). Apesar disso, o uso de análises avançadas de previsão do comportamento deste material nestes cenários, pode permitir a dispensa de materiais de proteção contra incêndio ao utilizar aço inoxidável (Azevedo, 2018).

Nesse contexto, a simulação computacional se destaca como uma ferramenta poderosa para a análise e previsão do comportamento de vigas de aço inoxidável em situações de incêndio. Dentre as metodologias mais utilizadas, o método dos elementos finitos (FEM) é uma das técnicas mais avançadas empregadas na simulação computacional de problemas estruturais (Albuquerque & Pitangueira, 2018).

O presente estudo pretende analisar as vigas de aço inoxidável, e com o auxílio do programa ANSYS, utilizando o FEM, possibilitará a modelagem das mudanças nas propriedades mecânicas do material ao longo do tempo e do espaço, fornecendo dados críticos para a tomada de decisões em projetos de engenharia (Thompson & Thompson, 2017).

Dessa forma, a combinação do conhecimento sobre o comportamento do aço inoxidável em altas temperaturas com as capacidades do ANSYS e do FEM representa um avanço significativo na engenharia estrutural. Esta abordagem possibilita a criação de edificações mais seguras e resistentes a condições extremas, como incêndios, garantindo uma proteção mais eficaz para vidas e patrimônios. Sendo assim, o contínuo aprimoramento dessas técnicas e sua aplicação prática são fundamentais para enfrentar os desafios cada vez mais complexos da construção civil contemporânea.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal realizar a validação numérica dos experimentos de ensaios de vigas de aço inoxidável submetidas a altas temperaturas e condições de incêndio, utilizando o método de elementos finitos. O foco está em determinar a capacidade de carga das vigas e o tempo de resistência em diferentes cenários de incêndio. Será utilizado o método de análise de solução que se fundamenta no Modelo de Elementos Finitos 3D.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Conduzir a análise estática não linear para avaliar a capacidade de resistência à temperatura ambiente, empregando comportamento plástico e considerando grandes deslocamentos (GMNIA, Geometrically and Materially Non-linear Imperfection Analysis);
- Executar a análise térmica transiente não linear para investigar o efeito da temperatura, com utilização de fogo padrão;
- Realizar a análise estática não linear para determinar a resistência ao fogo ao longo do tempo, considerando fogo padrão.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Cenário de incêndio

A problemática dos incêndios associadas às estruturas metálicas vem sendo amplamente abordada em diversos trabalhos, como os realizados por Lopes *et al.* (2019), Martins *et al.* (2022) e Wu *et al.* (2023). Isto porque, o conhecimento do comportamento dessas estruturas em cenários de elevadas temperaturas, é imprescindível para estudos que contemplem medidas de prevenção de eventos que acarretam grandes catástrofes e perda de vidas. Assim, o incêndio pode ser definido como um episódio onde o fogo se propaga fora de controle. Para que o incêndio se inicie, são necessários três elementos essenciais: combustível, oxigênio e calor, que caracterizam o conhecido popularmente como triângulo do fogo, representado na Figura 1 (Reis, 2011).



**Figura 1 – Triângulo do fogo.**

A determinação de um cenário de incêndio é crucial para garantir que as estruturas de uma construção metálica mantenham sua integridade pelo tempo necessário para a evacuação segura dos ocupantes (Del Prete *et al.*, 2016). A análise para um projeto contra incêndio deve considerar a escolha do cenário de incêndio mais adequado, cálculos da evolução da temperatura na estrutura afetada e a avaliação do comportamento mecânico dessa estrutura durante o incêndio. Assim, conforme descrito no Eurocódigo 1 parte 1-2, o cenário de incêndio deve ser determinado com base em uma avaliação de fatores de risco de incêndio (CEN, 2002).

A avaliação de risco de incêndio é determinada através de um processo estruturado envolvendo várias etapas. Primeiramente, identificam-se possíveis cenários de incêndio,

considerando diversas fontes e causas potenciais. Em seguida, avalia-se a probabilidade de ocorrência de cada um desses cenários identificados. Após essa análise, estima-se as consequências de cada cenário de incêndio, levando em conta os possíveis danos materiais, impactos na segurança humana e efeitos ambientais. Com base nessas estimativas, calcula-se o risco associado a cada cenário, combinando a probabilidade e as consequências. Finalmente, os cenários de incêndio são classificados de acordo com o risco apresentado, permitindo priorizar ações de prevenção e mitigação (Del Prete *et al.*, 2016).

Na Europa, os Eurocódigos Estruturais servem como normas regulamentadoras nacionais. Com exceção dos Eurocódigos 7 e 8, todos os demais incluem uma seção específica, a parte 1-2, destinada à análise da resistência ao fogo. A parte 1-2 do Eurocódigo 1 é utilizada para a verificação de segurança em situações de incêndio e no dimensionamento das estruturas, de acordo com o material especificado pelo projetista: Eurocódigo 2 (concreto), Eurocódigo 3 (aço), Eurocódigo 4 (estruturas mistas aço-betão), Eurocódigo 5 (madeira), Eurocódigo 6 (alvenaria) e Eurocódigo 9 (alumínio) (Reis, 2011).

### **3.2. Aço inoxidável**

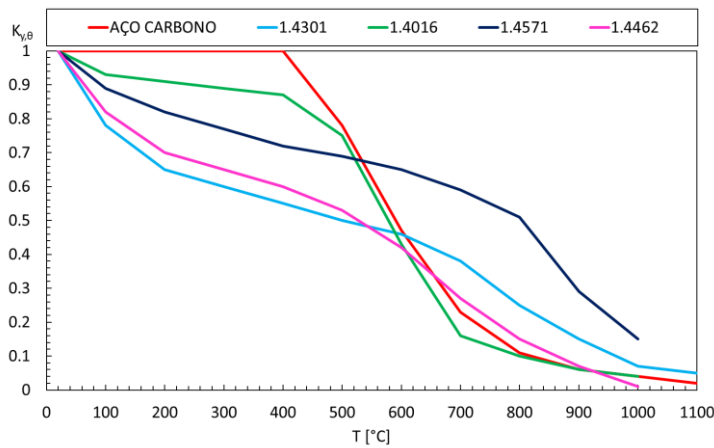
O aço inoxidável foi introduzido inicialmente entre 1912 e 1913 por Brearley no Reino Unido e por Maurer e Strauss na Alemanha. Atualmente, o termo aço inoxidável refere-se a ligas de ferro com resistência à corrosão, contendo no mínimo 10.5% de cromo (Gardner, 2005).

O uso do aço inoxidável como material estrutural está crescendo devido à sua resistência à corrosão e efeito estético (Gardner & Theofanous, 2008). Este material é particularmente adequado para estruturas em ambientes agressivos e altamente corrosivos, como plataformas de perfuração *offshore*, edifícios em alto-mar e estações de tratamento de esgoto. Com o aumento da produção, o aço inoxidável vem sendo gradualmente utilizado em construções mistas, como tubulações de aço preenchidas com concreto e vigas mistas de aço-concreto, para resolver o problema da corrosão em estruturas compostas de aço carbono e concreto (Wu *et al.*, 2023).

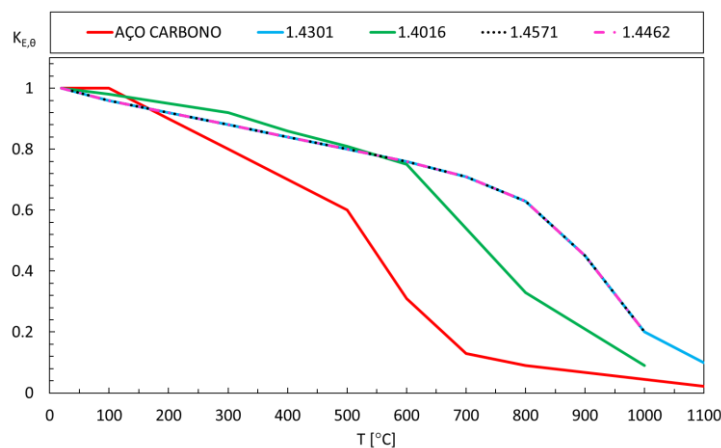
Apesar do custo inicial elevado, ele se torna competitivo ao longo do ciclo de vida, em função de sua baixa necessidade de manutenção e maior resistência ao fogo quando

comparado ao aço carbono. Tradicionalmente, o aço inoxidável austenítico é o mais utilizado em estruturas. Contudo, recentemente há um interesse crescente em aços ferríticos e austenítico-ferríticos (Duplex) por suas vantagens como maior resistência mecânica e menor custo devido à menor quantidade de níquel. Suas aplicações variam desde edifícios até torres, suportes de cobertura e pontes pedonais e rodoviárias (Arrais *et al.*, 2021).

Por outro lado, para temperaturas abaixo de 550 °C, o aço carbono é vantajoso em relação ao aço inoxidável devido à sua melhor retenção de resistência, como mostra a Figura 2. No entanto, considerando o fator de rigidez, o aço inoxidável se destaca em todas as faixas de temperatura quando comparado ao aço carbono, conforme indicado na Figura 3 (Ellobody, 2012).



**Figura 2 – Fator de redução de força.**

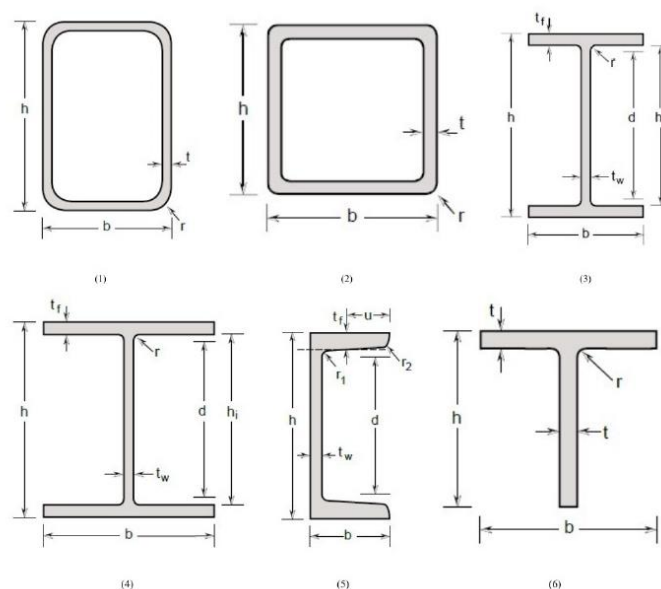


**Figura 3 – Fator de redução de rigidez.**

### 3.3. Vigas de seção retangular oca (RHS)

Conforme definido por Camacho (2013), as vigas, que têm a função de atravessar espaços suportando principalmente esforços de flexão e cisalhamento, sob a ação de forças de flexão, essas estruturas trabalham principalmente em flexão simples, especialmente quando as cargas atuam ao longo de um dos eixos principais de inércia da sua seção transversal. A análise e o dimensionamento de vigas metálicas submetidas à flexão são componentes cruciais na engenharia estrutural, desempenhando um papel central no projeto de uma ampla gama de estruturas, desde edifícios e pontes até complexas instalações industriais. Conforme afirmado por Hibbeler (2013), o projeto de estruturas metálicas exige uma compreensão sólida dos princípios de resistência dos materiais. A flexão é um fenômeno fundamental que ocorre quando vigas metálicas são submetidas a forças transversais, resultando em sua deformação e curvatura ao longo do comprimento (Vitali, 2024).

Diferentes tipos de vigas, como as vigas de seção retangular oca (*Rectangular Hollow Section – RHS*), seção quadrada oca (*Square Hollow Section – SHS*), I, H, UPN e T, representadas na Figura 4, são utilizados conforme as demandas específicas do projeto, considerando fatores como carga, comprimento do vão e resistência à torção.



**Figura 4 – Diferentes tipos de viga: (1) RHS, (2) SHS, (3) I, (4) H, (5) UPN e (6) T, (Adaptado de Millstock Stainless, 2015).**

Vigas RHS, em particular, são amplamente usadas em estruturas de alta capacidade de carga devido às suas excelentes propriedades mecânicas e tolerâncias geométricas. Em engenharia estrutural, membros curvos de seção oca de aço, frequentemente produzidos pela curvatura por rolo a frio, são essenciais para aplicações como cúpulas, telhados em arco, e pontes, devido à sua eficiência estrutural e estética (Chiew *et al.*, 2016).

### **3.4. Simulações Numéricas**

Simulações numéricas são amplamente utilizadas para prever cenários sob condições rigorosamente definidas, onde programas de computador e algoritmos traduzem interações e modelos matemáticos complexos. No campo científico, as simulações vão além da mera previsão, desempenhando um papel vital na construção de modelos e na elucidação de relações causais. As simulações numéricas tornaram-se gradualmente um método de pesquisa conveniente e confiável por meio da validação contínua de experimentos de modelos conduzidos por pesquisadores (Krause, 2023; Peng *et al.*, 2022).

Diferentes métodos de simulações numéricas são aplicados para resolver problemas complexos como por exemplo o Método dos Volumes Finitos (MVF), que resolve equações de conservação dividindo o domínio em volumes de controle (VC) e aplica a equação da conservação a cada VC. Esse método é conservativo, passível de adaptações quanto a geometrias complexas, e apresenta a característica de não depender de um sistema de coordenadas específico (Gonçalves, 2007).

Além dele, há também o Método das Diferenças Finitas (MDF), que aproxima a equação diferencial de conservação em uma malha, substituindo derivadas por valores nos nós da malha. Esse método, resulta em equações algébricas para cada nó, envolvendo valores das variáveis nos nós vizinhos. Assim, ele pode ser aplicado a qualquer malha, embora seja mais comumente empregado em malhas estruturadas onde as linhas servem como coordenadas locais (Gonçalves, 2007).

Outro método frequentemente utilizado é o Método dos Elementos Finitos (FEM), que possui como objetivo determinar o estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária submetido a influências externas. Este método emprega um tipo de cálculo denominado de análise de estruturas e pode ser usado para estudar edifícios, pontes, barragens e outras estruturas (Azevedo, 2003).

Para além do exposto, o FEM é uma técnica amplamente utilizada para configurar e desenvolver soluções para equações complexas, como equações às derivadas parciais. Esse método, nos últimos anos, vem sendo considerado muito efetivo para simulações de cálculos estruturais e seus componentes (Panthi *et al.*, 2007; González-Estrada *et al.*, 2017; Albuquerque & Pitangueira, 2018). De acordo com Azevedo (2003), esse método, ao contrário dos demais, só é eficaz quando há acesso a um computador.

Este método também aplicável em problemas complexos que podem ser simplificados através da modelagem e resolução computacional, em vez de serem tratados analiticamente com técnicas de engenharia tradicionais. Esta ferramenta é usada para resolver problemas complexos, para os quais geralmente não existem soluções analíticas ou cuja resolução manual demandaria muito tempo e recursos (Thompson & Thompson, 2017), além de apresentar a vantagem de lidar com formas geométricas variadas (Gonçalves, 2007).

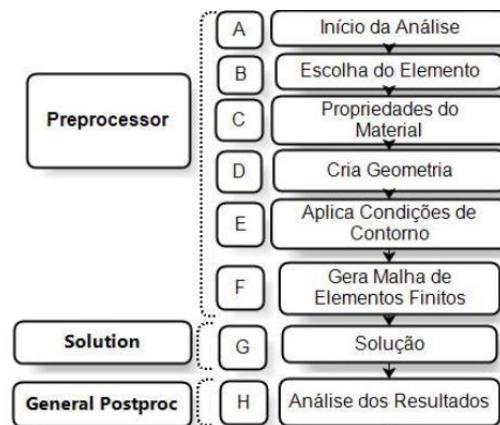
A construção de soluções complexas dessa técnica de análise para engenharia, exige o desenvolvimento de programas baseados em formulações específicas ou a utilização de programas, como o ANSYS. Este programa é uma ferramenta multifísica essencial para diversas aplicações na engenharia, sendo utilizado tanto no aprendizado de disciplinas acadêmicas quanto na previsão e resolução de problemas reais (Madenci & Guven, 2015).

### **3.4.1. ANSYS**

O ANSYS é capaz de simular problemas em ampla aplicação dentro da área de engenharia (Madenci & Guven, 2015). Entretanto, neste trabalho, será utilizado para a execução de análises estruturais mecânicas, térmicas e termomecânicas de vigas em aço inoxidáveis.

Para a análise de elementos finitos, há etapas a serem seguidas, como demonstrado na Figura 5. Inicialmente há necessidade de criar a geometria do modelo, tipos de elementos e definir as propriedades dos materiais, assim se torna possível fazer as malhas do FEM. No programa ANSYS, essas etapas encontram-se definidas no pré-processamento. Com a aplicação posterior de cargas e restrições, definem-se as opções de soluções e então o problema é resolvido. Estas etapas são definidas a partir da solução. Assim que a solução estiver concluída, os resultados podem ser visualizados no pós-processamento. Por fim, os resultados do programa são comparados com resultados

experimentais ou modelos matemáticos para garantir a razoabilidade dos resultados (Thompson & Thompson, 2017).



**Figura 5 - Fluxograma de modelagem computacional por MEF (Adaptado de Hecke, 2010).**

### **3.5. Trabalhos Relacionados – Aplicações**

A Tabela 1 apresenta uma compilação de estudos realizados com diferentes seções de vigas utilizando diversos programas de análise termomecânica. Esses estudos investigam o comportamento mecânico de vigas com seções RHS, SHS, seção circular oca (CHS), seção retangular (SR) e seções laminadas I, avaliando parâmetros como resistência à flexão, modos de instabilidade e temperatura crítica. Os programas utilizados, como o ABAQUS, SAFIR e SISMEF, foram utilizados para simular diferentes condições de carga e verificar o comportamento das vigas em contextos variados, como estruturas civis, estruturas especiais (pontes) e estruturas industriais.

**Tabela 1 – Compilação de estudos realizados com diferentes seções de vigas utilizando diversos *softwares* de análises estrutural.**

<b>Tipo de seção</b>	<b>Software</b>	<b>Referência</b>
RHS	SAFIR	Lopes <i>et al.</i> (2024)
SHS e CHS		Lopes <i>et al.</i> (2019)
I		Real <i>et al.</i> (2008)
I		Real <i>et al.</i> (2004)
I	ABAQUS	Xing <i>et al.</i> (2021)
RHS		Fan <i>et al.</i> (2019)
SR		Ding <i>et al.</i> (2021)
SHS	SISMEF	Renaud & Zhao (2009)

O estudo de Lopes *et al.* (2024), conduzido em vigas RHS 150x100x5 de aço inoxidável austenítico 1.4301, investigou a resistência ao fogo dessas estruturas por meio de ensaios de flexão em três pontos, tanto em condições estáticas, em três diferentes temperaturas 500, 600 e 700 °C, quanto transientes. Os dados experimentais estáticos de carregamento máximo obtidos foram posteriormente comparados com a resistência elástica e plástica esperada, e validados através de modelos numéricos utilizando o programa SAFIR, que empregou as propriedades analíticas estabelecidas no Eurocódigo 3.

Vila Real *et al.* (2008) conduziram um estudo analítico sobre a flambagem em vigas de seção I sob condições de incêndio, avaliando a influência de diferentes tipos de carregamento. Os resultados foram comparados com simulações numéricas realizadas no programa SAFIR e verificados com base nas curvas de dimensionamento do Eurocódigo 3, apresentando uma boa concordância com os dados obtidos para vigas de aço inoxidável em situações de incêndio.

O trabalho realizado por Fan *et al.* (2019) conduziram análises numéricas no programa ABAQUS, com intuito de validar modelos com resultados experimentais. Os resultados mostraram que o modelo se aproxima dos dados obtidos inicialmente experimental. A análise continua para verificação de como a resistência ao fogo, em vigas de aço inoxidável com três lados expostos ao fogo, se comportam com as mudanças em altura, largura e espessura das seções da viga.

## 4. MATERIAIS

Os materiais e seções empregados neste estudo foram analisados em duas etapas. Na primeira, foi utilizada uma base de dados existente para realizar análises preliminares, definindo os parâmetros iniciais de comportamento estrutural. Na segunda etapa, foram realizadas variações nos materiais e seções, permitindo análises paramétricas para avaliar como diferentes combinações influenciam o desempenho estrutural sob condições de altas temperaturas e incêndio.

### 4.1. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais como densidade [ $\rho_a$ ] e expansão térmica [ $\frac{\Delta l}{l}$ ], são calculadas da mesma forma, tanto para o material da base de dados quanto para os materiais de estudo paramétrico. A densidade dos materiais foi definida como  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ . Enquanto para a expansão térmica, foi necessário aplicar a Equação 1, 2 e 3, do Eurocódigo 3 (CEN, 2023) para os aços austeníticos, duplex e ferríticos respectivamente.

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(16.54 + 3.58 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a) \cdot (\theta_a - 20)}{10^6} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(12.98 + 4.14 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a) \cdot (\theta_a - 20)}{10^6} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(9.87 + 3.89 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a) \cdot (\theta_a - 20)}{10^6} \quad (3)$$

Onde,  $\theta_a$  é a temperatura [°C].

#### 4.1.1. Base de dados

Após a realização da pesquisa de artigos científicos, o trabalho de Fan *et al.* (2016) foi eleito para a validação de dados experimentais. No trabalho em questão, foram realizados testes experimentais de vigas RHS de aço inoxidável S30408 com três

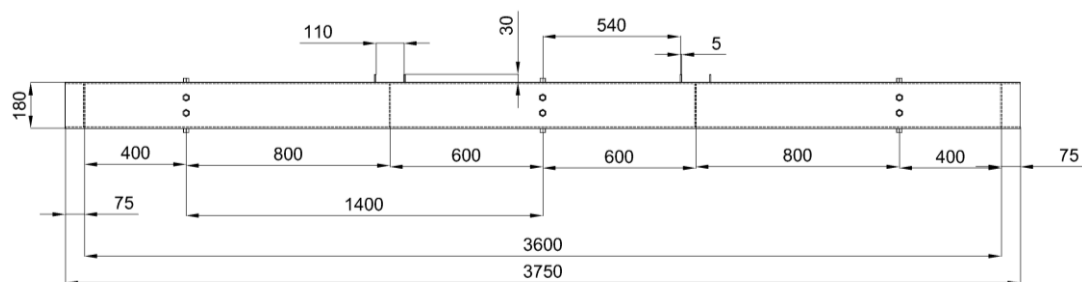
diferentes seções e com três lados expostos ao fogo. Os valores médios relativos às propriedades mecânicas à temperatura ambiente do material encontram-se apresentados na Tabela 2, e o gráfico tensão-deformação no Anexo A.

**Tabela 2 – Propriedades mecânicas média à temperatura ambiente do material (Adaptado de Fan *et al.*, 2016).**

Código da amostra	$E_0$ [GPa]	$\sigma_{0,01}$ [MPa]	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]	n	m	n'	m'	$\epsilon_{t0,2}$ $10^{-3}$	$\epsilon_u$
SPC-1	190.355	174.72	257.42	717.07	7.73	2.26	10.36	2.07	3.35	-
SPC-2	191.166	166.16	264.52	715.00	6.44	2.29	9.57	2.04	3.38	0.579
SPC-3	190.727	160.27	262.40	725.94	6.13	2.27	8.97	2.07	3.38	0.633
<b>Média</b>	190.749	167.27	261.45	719.34	6.77	2.27	9.63	2.06	3.37	0.606

Em que  $E_0$  é o módulo elástico inicial do material;  $\sigma_{0,01}$  é a tensão correspondente a 0.01% da deformação residual;  $\sigma_{0,2}$  é a tensão de escoamento;  $\sigma_u$  é a tensão última do material; n é o expoente de endurecimento; m é o parâmetro de endurecimento modificado; n' é o valor de modificação do expoente de endurecimento ajustado por um método de mínimos quadrados com base nos dados de teste; m' é o valor de modificação do parâmetro ajustado pelo método dos mínimos quadrados com base nos dados de teste;  $\epsilon_{t0,2}$  representa a deformação de  $\sigma_{0,2}$ ;  $\epsilon_u$  é a deformação última.

O trabalho de Fan et al. (2016) teve como objetivo determinar as temperaturas críticas das seções RHS 140x100x5, RHS 180x100x5 e RHS 220x100x5, analisadas por meio de um ensaio experimental de flexão em quatro pontos. Para isso, foram utilizadas seis amostras, conforme a Tabela 3. A amostra B1 não foi considerada, pois os autores não contabilizaram seus dados termo-mecânicos. As dimensões das vigas do experimento são apresentadas na Figura 6.



**Figura 6 – Dimensão da viga experimental (Adaptado de Fan *et al.*, 2016).**

A viga possui 3750 mm de comprimento, no qual o comprimento efetivo é de 3600 mm e o comprimento de aplicação do fogo é de 3160 mm.

Para identificar a temperatura crítica de cada seção, o ensaio termomecânico foi conduzido com base em 2 critérios para determinação do tempo de resistência ao fogo, estabelecidos pela norma EN 1363-1:2020 (CEN, 2020).

- Critério 1: Deflexão mensurada  $\geq 1.5 * D_{limit}$ ;

ou,

- Critério 2:  $D_{limit}$  e  $\frac{dD}{dt}_{limit}$  são excedidos.

Podendo  $D_{limit}$  e  $\frac{dD}{dt}_{limit}$  serem calculados por meio das Equações 4 e 5.

$$D_{limit} = \frac{L^2}{400d} \quad (4)$$

$$\frac{dD}{dt}_{limit} = \frac{L^2}{9000d} \quad (5)$$

Onde  $D$  é a deformação máxima vertical no ponto médio da amostra no teste de fogo;  $\frac{dD}{dt}$  é a taxa de deformação no tempo do ponto médio da amostra no teste de fogo;  $L$  é o comprimento efetivo da amostra e  $d$  é a altura da seção transversal da amostra (Fan *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos por Fan *et al.* (2016) são apresentados na Tabela 3, sendo eles utilizados no presente trabalho para fazer a validação dos modelos numéricos.

**Tabela 3 - Resultados experimentais de ensaios experimentais de vigas com fogo, (Adaptado de Fan *et al.*, 2016).**

Amostra	Seção	Taxa de carregamento	Deformação vertical no ponto médio				Temperatura Máxima [°C]	Modo de falha
			Valor da deformação vertical [mm]		Taxa de deformação [mm/min]			
			Valor limite do critério (1)	Valor experimental	Valor limite do critério (2)	Valor experimental		
B2	RHS 180x100x5	0.27	180.00	126.73	8.00	12.01	783	Flexão no plano
B3	RHS 180x100x5	0.39	180.00	121.05	8.00	17.21	740	
B4	RHS 180x100x5	0.51	180.00	126.88	8.00	22.71	660	
B5	RHS 140x100x5	0.39	231.43	132.08	10.29	19.67	714	
B6	RHS 220x100x5	0.39	147.27	131.22	6.55	30.39	763	

#### 4.1.2. Materiais utilizados no estudo paramétrico

Para realizar o estudo paramétrico, é essencial selecionar uma variedade de parâmetros que permitam avaliar diferentes materiais, seções e valores de carga (taxa de carregamento). Neste contexto, foram escolhidos quatro tipos distintos de aço inoxidável, sendo eles dois austeníticos, um ferrítico e um duplex, suas propriedades mecânicas estão apresentadas na Tabela 4.

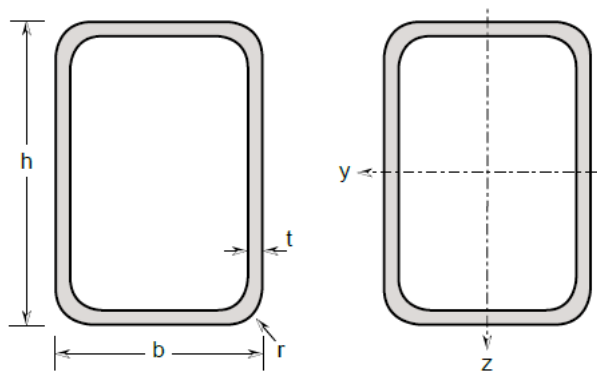
**Tabela 4 – Tipos de aço inoxidável e suas características específicas (Adaptado de CEN 2006).**

Tipo de aço inoxidável		Forma de Produção			
		Enformado a frio		Laminado a quente	
		Espessura nominal t			
		t ≤ 6 mm		t ≤ 12 mm	
		$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]
<b>Ferrítico</b>	<b>1.4016</b>	260	450	240	450
<b>Austenítico</b>	<b>1.4301</b>	230	540	210	520
	<b>1.4571</b>	240	540	220	540
<b>Duplex</b>	<b>1.4462</b>	480	660	460	660

Além dos materiais, foram utilizados sete tipos de seções transversais variando altura, largura e espessura entre elas (Tabela 5). Suas dimensões estão ilustradas na Figura 7.

**Tabela 5 – Seções transversais das vigas (Adaptado de Millstock Stainless, 2015).**

Seção	h [mm]	b [mm]	t [mm]	r [mm]
100x50x5	100	50	5	10
150x80x4	150	80	5	10
150x100x5	150	100	5	10
180x100x5	180	100	5	10
200x100x5	200	100	5	10
300x200x5	300	200	5	10
300x200x8	300	200	8	20



**Figura 7 – Dimensões das seções transversais das vigas (Adaptado de Millstock Stainless, 2015).**

Foi calculado para cada seção transversal de viga a sua esbeltez. Para isso, foi utilizado o EN1993-1-2 e EN1993-1-5 (CEN, 2023; CEN, 2021). Os critérios estabelecidos para determinar a esbeltez da viga são:

- $\lambda_{p,\theta} \leq \lambda_{p0,\theta}$  deve ser classificado como não esbelta;
- $\lambda_{p,\theta} > \lambda_{p0,\theta}$  deve ser classificado como esbelta.

Onde  $\lambda_{p0,\theta}$  e  $\lambda_{p,\theta}$  podem ser calculados por meios das Equações 6, 7 e 8. Sendo que a Equação 6 para aços austeníticos e a Equação 7 para aços duplex e ferríticos.

$$\lambda_{p0,\theta} = (0.27 + \sqrt{0.0279 - 0.015\Psi})^{1.33} \sqrt{\xi_{\theta}} \quad (6)$$

$$\lambda_{p0,\theta} = (0.3 + \sqrt{0.045 - 0.015\Psi})^{1.33} \sqrt{\xi_{\theta}} \quad (7)$$

$$\lambda_{p,\theta} = \frac{\bar{b}}{t} \frac{1}{28.3 \varepsilon_{fi} \sqrt{k_{\sigma}}} \quad (8)$$

Onde  $\Psi$  é a taxa de tensão;  $\xi_{\theta}$  é o fator de temperatura elevada;  $\bar{b}$  é a distância entre apoios da viga;  $t$  é a espessura da seção transversal;  $k_{\sigma}$  é o fator de flambagem correspondente a taxa de tensão  $\Psi$ ;  $\varepsilon_{fi}$  é o parâmetro do material dependendo da tensão de escoamento para a situação de incêndio.

Para esta análise, foram verificadas todas as seções, tanto as usadas no experimento de Fan *et al.* (2016), quanto as selecionadas para as análises paramétricas,

sendo que todas as seções são susceptíveis de fenómenos de instabilidade, ou seja, esbeltas.

Após a seleção dos parâmetros, utilizou-se o programa Excel para gerar as curvas tensão-deformação de cada material em diferentes temperaturas, sendo elas 20 °C, 100 °C até 1000 °C, com intervalo de 100 °C entre cada temperatura. Para o traçado da superfície plana (*flat*) dessas curvas, aplicou-se a fórmula de Ramberg-Osgood, mostrado nas Equações 9 e 10, com auxílio de tabelas reguladoras para as temperaturas, presentes no Eurocódigo 3 (CEN, 2023). A tensão foi trabalhada com uma variação de 1 MPa.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E_{a,\theta}} + 0.002 \left[ \frac{\sigma_{\theta}}{f_{p0,2,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \text{para } \sigma_{\theta} \leq f_{p0,2,\theta} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta} - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left( \varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} \right) \left( \frac{\sigma_{\theta} - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{p0,2,\theta}$$

para  $f_{p0,2,\theta} \leq \sigma_{\theta} \leq f_{u,\theta}$  (10)

Onde  $\sigma_{\theta}$  é a tensão à temperatura  $\theta_a$ ;  $\varepsilon_{\theta}$  é a deformação à temperatura  $\theta_a$ ;  $E_{a,\theta}$  é a inclinação da faixa elástica linear na temperatura  $\theta_a$ ;  $f_{p0,2,\theta}$  é a tensão limite de proporcionalidade à prova de 0.2% à temperatura  $\theta_a$ ;  $\varepsilon_{p0,2,\theta}$  é a deformação total correspondente a  $f_{p0,2,\theta}$ ;  $E_{p0,2,\theta}$  é o módulo tangente em  $f_{p0,2,\theta}$ ;  $\varepsilon_{u,\theta}$  é a deformação à tensão  $f_{u,\theta}$ ;  $f_{u,\theta}$  é a tensão efetiva de cedência a 2% de deformação total na temperatura  $\theta_a$ ;  $n_{\theta}$  e  $m_{\theta}$  são expoentes que definem o grau de não linearidade do material na temperatura  $\theta_a$ .

No mesmo programa, foi necessário criar as curvas tensão-deformação para os cantos (*corners*), de cada material. Para isso, foi preciso recalcular as tensões limite de escoamento e última, utilizando uma proporcionalidade descrita nas Equações 11 e 12 (artigo das equações).

$$\sigma_{0,2,c} = \frac{1.881\sigma_{0,2,v}}{\left(\frac{r_i}{t}\right)^{0.194}} \quad (11)$$

$$\sigma_{u,c} = 0.75\sigma_{0,2,c} \frac{\sigma_{u,v}}{\sigma_{0,2,v}} \quad (12)$$

Onde  $\sigma_{0,2,c}$  é a tensão de escoamento do *corner*;  $r_1$  é o raio da seção trabalhada;  $t$  é a espessura da seção;  $\sigma_{u,c}$  é a tensão última do *corner*;  $\sigma_{0,2,v}$  é a tensão de escoamento da superfície plana;  $\sigma_{u,v}$  é a tensão última da superfície plana.

As curvas de tensão-deformação obtidas para cada material, tanto para o *flat* quanto para o *corner*, podem ser encontradas no Anexo A.

Após esse procedimento, os dados coletados foram simplificados aplicando uma variação de 0 a 1 MPa para que o ANSYS estabelecesse a curva tangencial e posteriormente até a tensão de cedência do material. Após isso, foi aplicado uma variação constante para cada temperatura, resultando em uma média de aproximadamente 20 pontos nas curvas de tensão-deformação para as superfícies planas dos materiais. Já para as regiões não planas (*corners*), a média foi em torno de 35 pontos. Isso acontece porque a mesma variação utilizada para o “*flat*” de uma determinada temperatura é também aplicada ao “*corner*”. Por exemplo, se a curva de tensão-deformação a 20 °C para o “*flat*” é gerada com uma variação de 20 MPa por ponto, o *corner* a 20 °C seguirá a mesma variação de 20 MPa por ponto. No entanto, como o “*corner*” possui uma tensão limite maior que a do “*flat*”, isso resulta em um número maior de pontos para o *corner*.

Essa simplificação foi adotada para facilitar a inserção dos pontos de cada material no ANSYS, devido à limitação do software, que permite um máximo de 100 pontos de dados de tensão-deformação. No entanto, não foi necessário utilizar o número máximo de pontos, uma vez que aproximadamente 20 pontos foram suficientes para descrever a curva tensão-deformação de maneira simplificada, porém ainda completa e representativa.

## 4.2. Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas dos materiais analisados, tanto para o material descrito por Fan *et al.* (2016) quanto para os materiais do estudo paramétrico, seguem as normas do EN1993-1-2 (CEN, 2023). O estudo calcula propriedades térmicas específicas para diferentes tipos de aço inoxidável: austenítico, duplex e ferrítico. As propriedades analisadas incluem o coeficiente de emissividade [ $\varepsilon_m$ ], a condutividade térmica [ $\lambda_a$ ] e o calor específico [ $c_a$ ].

Para a emissividade, adota-se um valor constante de  $\varepsilon_m = 0.4$  para todos os tipos de aço inoxidável. A condutividade térmica dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex é

calculada com base na Equação 13, enquanto para os aços inoxidáveis ferríticos utiliza-se a Equação 14.

$$\lambda_a = 14.6 + 1.27 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (13)$$

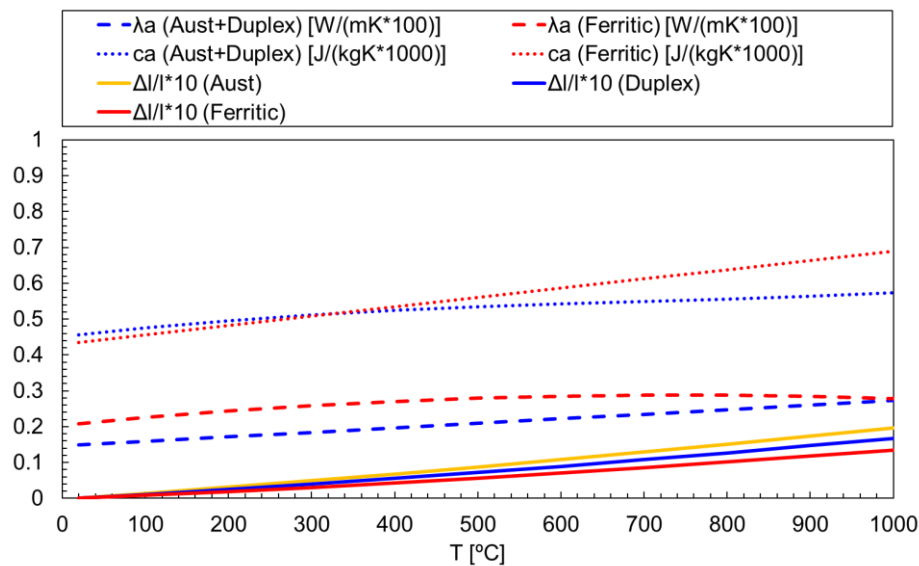
$$\lambda_a = 20.4 + 2.28 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a + 1.54 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a^2 \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (14)$$

Para o calor específico, a Equação 15, nos mostra o cálculo para os materiais austeníticos e duplex, enquanto a Equação 16 representa os aços ferríticos.

$$c_a = 480 + 0.28 \cdot \theta_a - 2.91 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_a^2 + 1.34 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_a^3 \quad [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (15)$$

$$c_a = 430 + 0.26 \cdot \theta_a \quad [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (16)$$

A Figura 8, representa o gráfico das propriedades térmicas dos aços inoxidáveis.



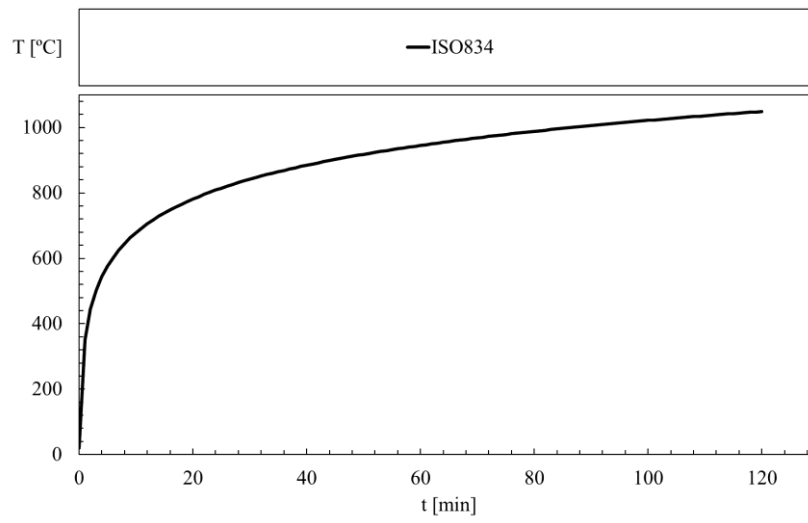
**Figura 8 - Gráfico das propriedades térmicas dos aços inoxidáveis.**

Ainda foi necessário construir a curva padrão do fogo ISO834, a curva de temperatura média deve seguir a Equação 17:

$$T = 345 * \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (17)$$

Onde  $T$  é a temperatura em °C; e  $t$  é o tempo em minutos.

Após a aplicação dessa equação variando o tempo de 1 em 1 minuto, obtém a curva ISO834 (Figura 9).



**Figura 9 - Gráfico da curva padrão do fogo ISO834.**

## 5. MÉTODOS DE ANÁLISE

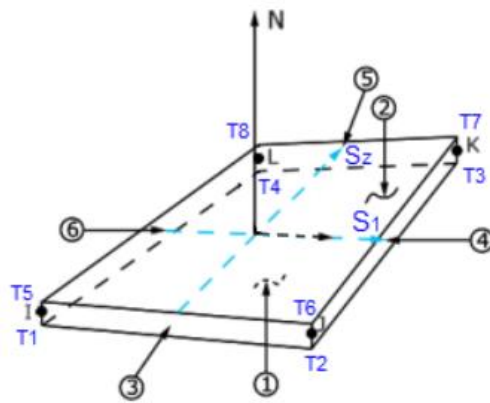
Para as simulações numéricas, foi utilizado o programa ANSYS 2024 R2, escolhido pela sua flexibilidade. Complementarmente, o Excel foi utilizado para a análise e organização dos dados dos materiais.

O programa ANSYS utiliza diferentes métodos de resolução. No presente trabalho foi utilizado o método de Newton-Raphson, que consiste num processo incremental e de iterações para determinar a posição de deformada do elemento de viga.

Paras as análises foram utilizados 3 tipos de elementos, *SHELL 131*, *SHELL 181* e *BEAM 188*. Cada elemento possui características e utilizações diferentes para as simulações conforme o guia do ANSYS (ANSYS, Inc., 2024). O elemento *SHELL 131* é um elemento de casca 3D, em camadas, com capacidade de condução térmica tanto no plano quanto através da espessura. Com quatro nós e até 32 graus de liberdade de temperatura por nó, este elemento é ideal para análises térmicas tridimensionais, podendo ser aplicado em condições de estado estacionário ou transiente, permitindo gerar distribuições de temperatura que podem ser transferidas para elementos estruturais de casca, facilitando a modelagem de flexão térmica.

O elemento *SHELL 181* é ideal para a análise de estruturas de cascas finas a moderadamente grossas. Ele possui quatro nós, cada um com seis graus de liberdade: três translações (nas direções x, y e z) e três rotações (em torno dos eixos x, y e z). Se configurado como elemento de membrana, terá apenas graus de liberdade de translação. A versão triangular degenerada é recomendada apenas para preenchimento de malha. O *SHELL 181* é aplicável em análises lineares, de grandes rotações e de grandes deformações não lineares, considerando a variação da espessura da casca em cenários não lineares. Este elemento oferece integração total e reduzida no domínio do elemento.

A Figura 10 ilustra a geometria do elemento, a disposição dos nós, a direção normal e a estrutura multicamada. Esse elemento é definido pelos dados da seção da casca e por quatro nós designados como I, J, K e L.



**Figura 10 - Geometria do elemento *SHELL 181* (ANSYS, Inc., 2024).**

O elemento *BEAM 188* é ideal para a análise de estruturas de vigas esbelta a moderadamente curtas. Baseado na teoria de vigas de Timoshenko, ele incorpora os efeitos de deformação por cisalhamento, o que torna o modelo mais preciso em aplicações onde esses efeitos são relevantes. Além disso, o elemento permite simular tanto o empenamento livre quanto o restringido das seções transversais, proporcionando maior flexibilidade para diferentes condições de contorno.

Este é um elemento de viga em 3D que pode ser definido como linear, quadrático ou cúbico, com dois nós e seis ou sete graus de liberdade em cada nó. Os graus de liberdade incluem translações nas direções x, y e z, e rotações em torno dos mesmos eixos, com um sétimo grau opcional para a magnitude de empenamento. O *BEAM 188* é adequado para uma ampla gama de aplicações, incluindo análises lineares, não lineares, de grandes rotações e de grandes deformações.

### 5.1. Simulação

Durante o processo de simulação, o trabalho foi dividido em 3 etapas, sendo elas estática, térmica e termomecânica. Cada etapa foi definida para um tipo de análise. A análise estática tem o intuito de executar as simulações do material a 20 °C para obter a capacidade de carga suportada por cada seção transversal com as configurações de vigas já apresentadas. Durante a etapa térmica, as análises foram realizadas com o objetivo de calcular a distribuição de temperatura na viga em função do tempo. Já na etapa termomecânica, as simulações realizadas tiveram o intuito de obter o tempo de resistência ao fogo e os valores de temperatura crítica (máxima) da viga com uma carga constante aplicada.

O programa ANSYS segue uma abordagem em etapas, facilitando o processo de simulação. Inicialmente, é necessário escolher o tipo de análise; para este trabalho, foram selecionadas as análises estrutural e térmica. Em seguida, no módulo *PreProcessor*, os dados e parâmetros necessários são aplicados. Na etapa seguinte, no módulo *Solution*, os parâmetros de análise e convergência são definidos para serem processados pelo ANSYS. Por fim, no módulo *PostProcessor*, são obtidos e analisados os resultados da simulação

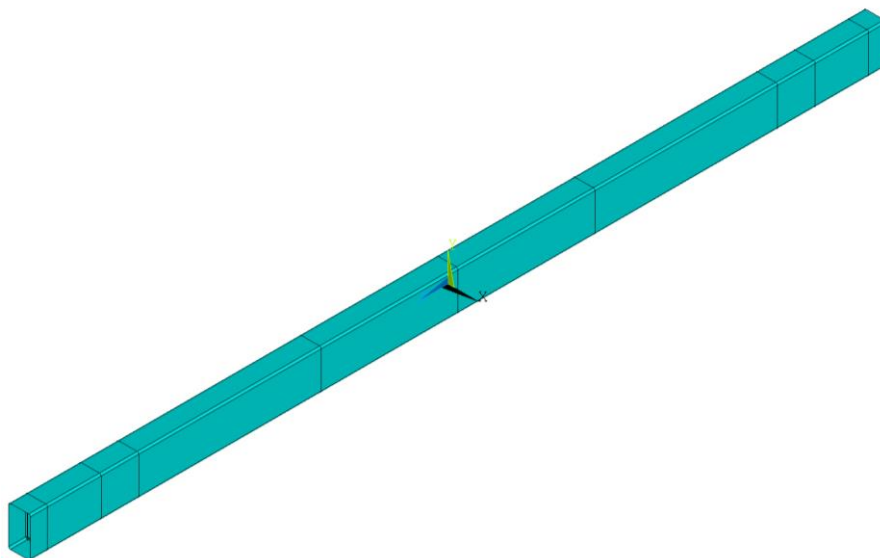
### **5.1.1. Análise estática (capacidade resistente à temperatura ambiente)**

Nesta seção, são descritos todos os passos realizados no ANSYS para avaliar o comportamento estático das vigas a 20 °C. O objetivo é determinar os valores das cargas máximas, que serão posteriormente aplicadas na análise termomecânica.

#### **5.1.1.1. *PreProcessor***

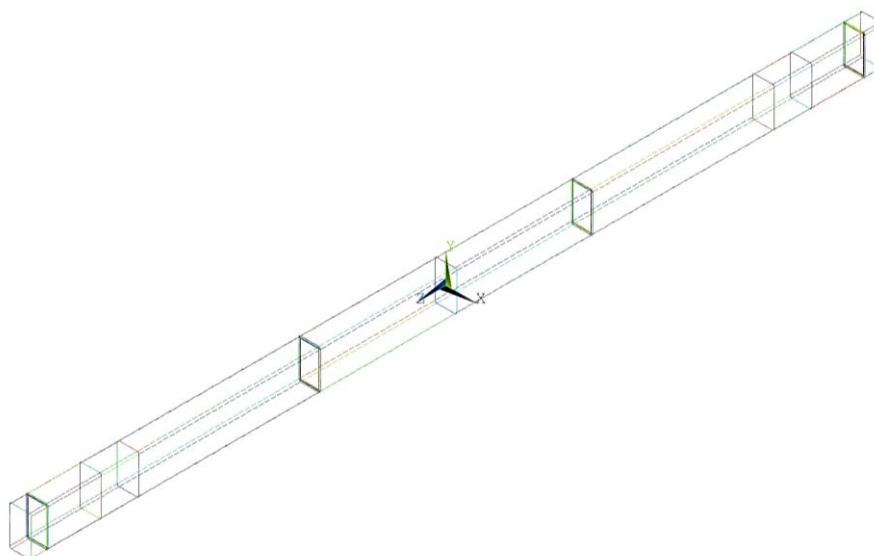
Nesta etapa, foi inicialmente selecionado o tipo de elemento a ser utilizado, escolhendo-se dois: *Shell 181* e *Beam 188*. Após a seleção dos elementos, é necessário aplicar as propriedades dos materiais, previamente definidas no Excel, como mencionado anteriormente. Em seguida, são definidas as seções dos materiais. Para o elemento *Shell 181*, foram criadas seções tanto para a parte reta da viga, “flat”, quanto para o canto da viga, “corner”. Além disso, foi definida uma seção circular de viga para o elemento *Beam 188*.

Para a criação do modelo geométrico, foi utilizado o módulo *Modeling*. Inicialmente, foram definidos os *Keypoints*, que posteriormente foram conectados por linhas. Essas linhas foram então extrudidas utilizando a operação *Operate-Extrude-Lines-Along Lines* para formar as áreas desejadas. O processo finalizado é ilustrado na Figura 11.



**Figura 11 – Áreas formadas no modelo geométrico.**

Em seguida, utilizando a ferramenta *Meshing*, foi aplicado o *Size Cntrls* para a criação da malha e controle do tamanho dos elementos, começando pela divisão das linhas, como mostra a Figura 12.

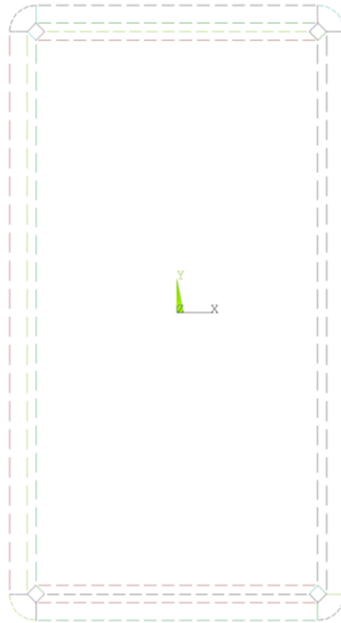


**Figura 12 - Divisões de linha para criação das malhas.**

Para divisão de malha (Figura 12), foi adotada uma malha mínima de 4 divisões por linha. Na região central da viga, até 0.6 m de extensão em ambos os lados, foram definidas 22 divisões. De 0.6 m a 1.4 m, em ambas as direções, a malha foi composta por 28 divisões. De 1.4 m a 1.565 m, foram aplicadas 6 divisões, enquanto de 1.565 m a 1.8

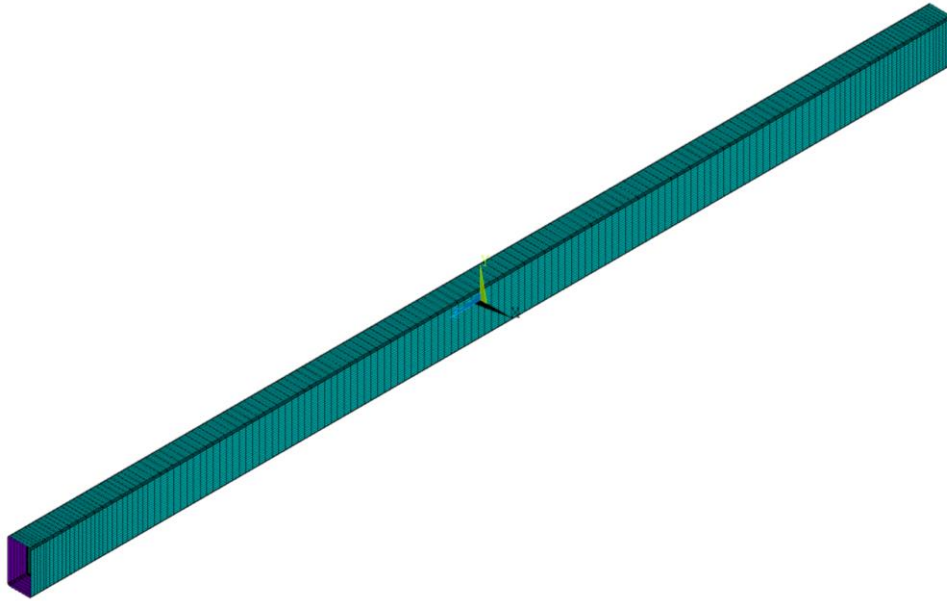
m, utilizou-se 10 divisões, por fim, de 1.8 m a 1.875 m, 4 divisões, sendo adaptável quando necessário.

Na seção transversal, Figura 13, a altura foi subdividida em 16 partes, enquanto a largura contou com 8 partes, variando conforme as dimensões da seção. Para seções de menor altura, foi aplicada uma quantidade reduzida de divisões e seções de maiores alturas foi aplicado mais divisões.



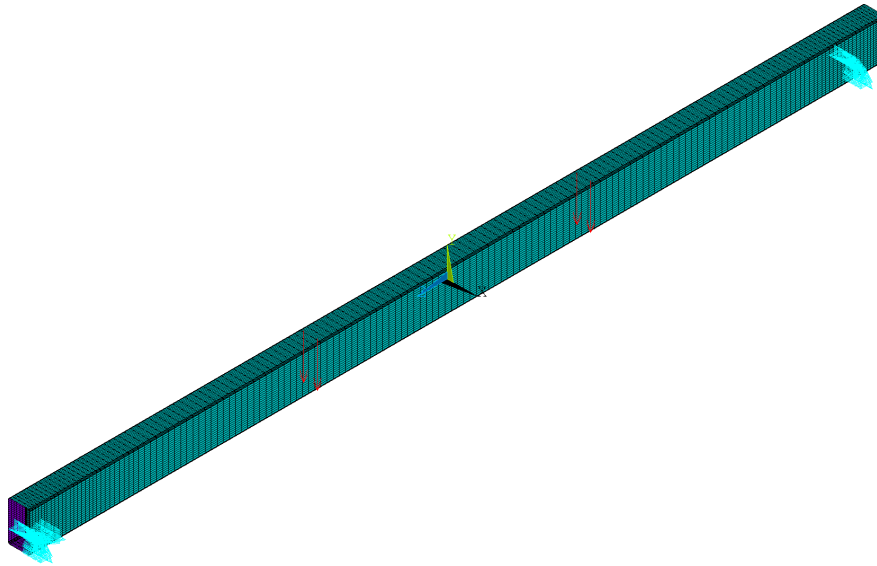
**Figura 13 - Divisões das linhas para malha na seção.**

Após essa etapa, no módulo *Default Attribs*, foram selecionados o material e a seção apropriados. Por fim, no módulo *Mesh*, as condições de material e seção foram aplicadas às áreas específicas da geometria, resultando na criação da malha, conforme ilustrado na Figura 14.



**Figura 14 - Modelo geométrico.**

Ainda no *PreProcessor*, foi utilizada a função de remoção de itens duplicados para garantir a precisão e evitar erros nos resultados da simulação, o que foi realizado através do comando *Number Cntrls*. Em seguida, no módulo *Loads*, foram aplicadas as condições de contorno, conforme ilustrado na Figura 15. Especificamente, a posição do suporte à esquerda foi restringida em todas as direções ( $x=y=z=0$ ), enquanto o suporte à direita teve o eixo  $z$  liberado ( $x=y=0$ ). O carregamento foi implementado através de uma tabela com duas linhas e duas colunas, variando a força aplicada de 0 até um valor predeterminado, dependendo das seções analisadas. Ainda neste módulo, foi possível introduzir a temperatura desejada de 20 °C para o caso estático.



**Figura 15 - Condições de contorno do modelo geométrico.**

#### **5.1.1.2. Solution**

Primeiramente, define-se o tipo de análise através do comando *Analysis Type*, etapa em que são aplicadas as condições gerais para a operação de simulação. Nesta fase, foi escolhida a análise estática. Em seguida, no menu *Sol'n Controls* (controle de solução), o processo é configurado através de três abas: *Basic* (básico), *Advanced NL* (análise não linear avançada) e *Nonlinear* (não linear).

Em *Basic* foi selecionada a opção *Large Displacement Static* (deslocamento estático grande) nas *Analysis Options* (opções de análise). Essa escolha refere-se a uma análise estática que considera grandes deslocamentos, onde o modelo leva em conta deformações significativas que influenciam a resposta estrutural (a posição de equilíbrio é determinada na posição de deformada). Nesse tipo de análise, a relação entre as forças aplicadas e os deslocamentos deixa de ser linear, exigindo uma formulação que considere as mudanças na geometria ao longo da aplicação das cargas.

Ainda nessa janela de operação, em *Time Control* (controle de tempo), foi definido um tempo final de carregamento conforme a tabela de parâmetros, com um *time increment* (incremento de tempo) inicial em torno de 500, esse valor pode variar até 1000, com uma variação mínima de 0.1. Foi ainda escolhida a opção para o programa anotar todos os passos da simulação, para análise de dados posteriormente.

Após esta etapa, em *Advanced NL* somente para selecionar a opção de o programa não fechar quando terminar a simulação.

Para finalizar o menu *Sol'n Controls*, na aba *Nonlinear*, ajusta-se a deformação plástica equivalente para 0.4, no *Cutback Control* (controle de redução de incremento). Esse ajuste visa permitir grandes incrementos de deformação plástica. A última etapa desse processo é em *Set Convergence Criteria* (tolerância de 0.001 m, com norma de convergência “infinite norm” e valor de referência de 3 m), que consiste em estabelecer parâmetros que determinam quando a simulação numérica é considerada convergida, ou seja, quando se atinge um nível aceitável de precisão na simulação.

### 5.1.1.3. *PostProcessor*

Nessa etapa, foram extraídos os dados das simulações realizadas para os diferentes materiais e seções. Os resultados observados incluíram o deslocamento no eixo *y* e a tensão equivalente de von Mises. O gráfico de deslocamento em função da força aplicada foi retirado a partir do *Menu TimeHist Postprocessor*, selecionando o ponto mais extremo superior da viga no seu centro com a função de *Nodal Solution – Displacement Y*.

## 5.1.2. Análise Térmica

Esta etapa tem como objetivo analisar o comportamento térmico das vigas, gerando dados que, em conjunto com os resultados da análise estática, serão utilizados na análise termomecânica posterior.

### 5.1.2.1. *PreProcessor*

No pré-processamento da análise térmica, foram utilizados os modelos previamente utilizados durante as simulações estáticas, mudando o modo de análise de Estrutural para Térmico. Essa mudança faz com que o elemento *Shell 181* mude para o elemento *Shell 131*, possibilitando a aplicação de condições térmicas ao modelo geométrico.

Após essa mudança, é necessário a criação de um nó fora do modelo geométrico, no qual servirá para aplicar o fluxo de calor no modelo. O fluxo de calor  $\dot{h}$  representado pela Equação 18, é composto por duas variáveis, convecção e radiação (CEN, 2002).

$$\dot{h} = \dot{h}_c + \dot{h}_r \quad [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

Onde,  $\dot{h}_c$  é determinado pela Equação 19;  $\dot{h}_r$  é determinado pela Equação 20.

A convecção do fluxo de calor pode ser determinada por:

$$\dot{h}_c = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (19)$$

Onde,  $\alpha_c$  é o coeficiente de fluxo de calor por convecção [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];  $T_g$  é a temperatura do gás nas proximidades do membro exposto ao fogo [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_m$  é a temperatura da superfície do material [ $^{\circ}\text{C}$ ].

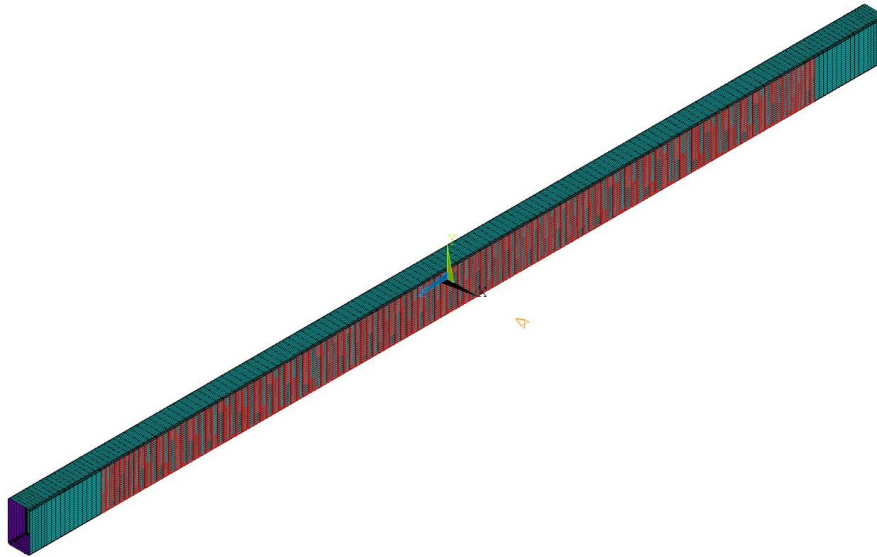
A radiação do fluxo de calor é determinada por:

$$\dot{h}_r = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (20)$$

Onde,  $\Phi$  é o fator de vista;  $\varepsilon_m$  é superfície de emissividade do material;  $\varepsilon_f$  é a emissividade do fogo;  $\sigma$  é a constante de Stephan Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2\text{K}^4]$ ).

Em *Loads*, aplicando as condições de temperatura inicial a todos os nós do modelo, no qual é definido ou a partir da temperatura da curva do forno da base de dados (Fan *et al.*, 2016) para cada amostra de validação, ou a  $20^{\circ}\text{C}$  quando aplicado aos modelos paramétricos seguindo a curva de fogo ISO834. Logo após essa etapa é aplicado a curva, ou do forno ou ISO834 dependendo da análise, no novo nó criado.

Como o fogo não é aplicado em toda a viga, somente em 3160 mm de comprimento, é necessário delimitar a área de convecção e radiação do modelo geométrico, como mostrado na Figura 16.



**Figura 16 - Representação dos limites de convecção e radiação na viga.**

Para a convecção nas áreas delimitadas, foi aplicado um *Film coeficiente* ( $\alpha_c$ ) de 25 [W/m<sup>2</sup>K], a tabela aplicada para convecção é a mesma definida para o nó anterior para definição da temperatura do gás (ISO 834 ou forno), e por último escolhido o *LKEY 2* para aplicação de convecção na parte externa da viga.

Já para a radiação, foi necessário configurar as opções de radiação, antes da aplicação desta condição fronteira, no qual foi definido a constante de Stephan Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]) e a diferença de temperatura entre zero absoluto e a escala zero aplicada que é de 273.15 K. Foi ainda definida a forma da aplicação do ambiente de radiação (*space node*) com a identificação do número do nó extra do modelo e a definição do ambiente de radiação (1). Após essa configuração, foi utilizado a aplicação por elementos para a radiação, para ser possível escolher em qual *LKEY* será afetado. O valor de emissividade ( $\epsilon_f$ ) atribuído foi de 1 e o ambiente de radiação (1).

#### **5.1.2.2. Solution**

Na etapa de solução, o *Analise Type* escolhido é o transiente, para obtermos distribuição de temperatura em função do tempo de análise do processo. Posteriormente em *Sol'n Control*, foi definido na aba *Basic* um tempo de simulação dependente dos experimentos de Fan *et al.* (2016) para cada amostra, e de 7200 segundos para as análises paramétricas, utilizando um incremento de tempo inicial de 60 segundos, com mínimo de 1 segundo e máximo de 60 segundos.

O critério de convergência utilizado na aba *Nonlinear* para o fluxo de calor (*Heat Flow*), com tolerância de 0.001 e valor de referência de  $10^{-6}$  W, que indica que o *software* terá o critério de paragem de  $10^{-9}$  W.

### 5.1.2.3. *PostProcessor*

Nesta etapa, foram retirados dados de temperatura nodal de todo o modelo para cada amostra no último instante de tempo da simulação, para a parte de validação de dados, e de tempos de 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos pré-determinados (CEN, 2009). Além disso alguns dados importantes para análise foram retirados a partir das temperaturas em função do tempo de simulação.

## 5.1.3. Análise Termomecânica

Esta análise será aplicada as condições analisadas na análise estática e térmica em conjunto, com objetivo de analisar o comportamento termomecânico dos materiais e seções trabalhadas.

### 5.1.3.1. *PreProcessor*

Utilizando as geometrias das análises térmicas, primeiramente há necessidade de selecionar em *Preferences* para ativar preferências estrutural e térmica. Após isso em *Loads-Applied-Force/Moment* para aplicar as cargas referente a cada material e seção calculados na análise estática no caso paramétrico. Foram usados níveis de carregamentos de  $n = 0.2, 0.4$  e  $0.6$  da carga máxima suportada por cada material e seção. O nível de carga é obtido a partir da Equação 21 (Gardner & Baddoo, 2006):

$$n = \frac{M_{aplicado}}{M_{c,y,Rd}} \quad (21)$$

Sendo  $M_{aplicado}$  é o momento aplicado no ponto médio da seção transversal da viga de aço inoxidável;  $M_{c,y,Rd}$  é a capacidade de flexão da viga de aço inoxidável a temperatura de 20 °C.

Já para a validação experimental foram selecionados os dados obtidos por Fan *et al.* (2016). As cargas foram divididas pela quantidade de nós referentes a superfície superior da viga e aplicado com uma variação de 0 até a carga selecionada em um tempo de 60 segundos e mantido carga aplicada até o final da simulação, a fim de facilitar a convergência do programa ANSYS.

#### **5.1.3.2. Solution**

Nesta etapa são aplicadas as condições de análise para a simulação termomecânica. Inicialmente escolhendo o tipo de análise para simular em *Analysis type- New Analysis-Static*. Após isso em *Sol'n Control* para aplicar as condições de convergência, na aba *Basic* utilizando um tempo máximo de incremento de aproximadamente 500 segundos acima do esperado para a validação do modelo experimental, e de 7200 segundos para as análises paramétricas. Em *Nonlinear* na etapa de *Set convergence criteria* é necessário adicionar o deslocamento (D) com tolerância de 0.001 m e valor de referência de 3 m, resultando no critério de paragem de 0.003 m para a análise.

#### **5.1.3.3. PostProcessor**

Nesta etapa, foram retirados os resultados para as análises de resultados em comparação com os de Fan *et al.* (2016). Tanto para a validação numérica, comparando com os resultados experimentais, quanto para os resultados paramétricos, retirando informações de deslocamento no eixo y, temperatura da viga, tensões de von Mises e o deslocamento no eixo y em função do tempo decorrido de simulação. Os dados obtidos serão discutidos posteriormente.

## 6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 6.1. Validação numérica

A partir das análises realizadas para as amostras B1 à B6 descritas no artigo de Fan *et al.* (2016), foram obtidos resultado estáticos, térmicos e termomecânicos. Para os resultados da análise numérica estática foi obtido o gráfico da força aplicada em função do deslocamento eixo y (Figura 17), para determinação da capacidade resistente.

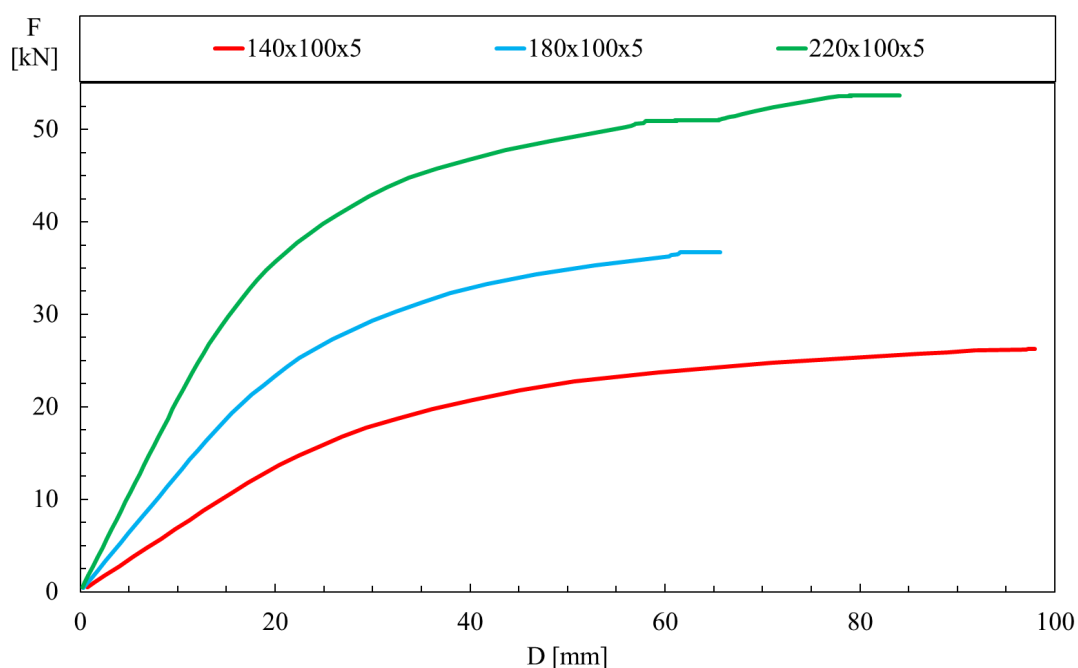


Figura 17 - Gráfico da análise numérica estática da força em função do deslocamento.

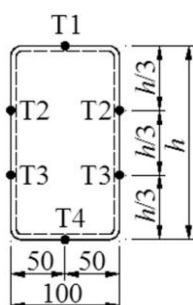
O gráfico da Figura 17 representa a força máxima suportada pelas seções transversais da viga e seu deslocamento à temperatura de 20 °C. Foi feita a comparação destes resultados com os do artigo base, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação entre os resultados estáticos experimental e numérico.

Seção	Força máxima Experimental [N] (Fan <i>et al.</i> , 2016)	Força máxima Numérica [N] (ANSYS)	Diferença
140x100x5	25342	26296	3.77%
180x100x5	38233	36714	3.97%
220x100x5	52543	53686	2.18%

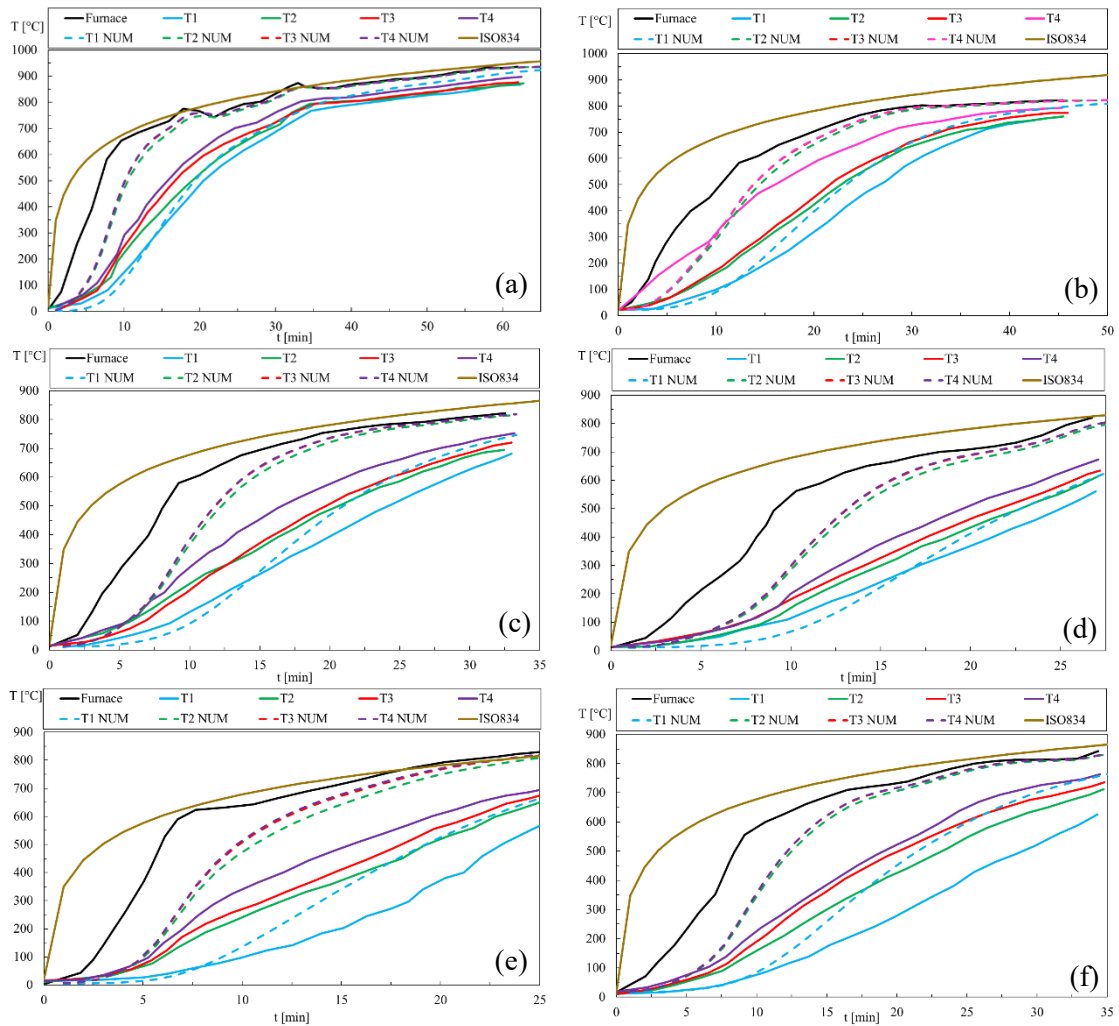
Como representado na Tabela 6, é possível verificar que os resultados obtidos pelo modelo numérico se tornam muito próximo dos resultados encontrados pelos ensaios experimentais, apresentando uma diferença média inferior a 4%.

Para a validação térmica do modelo, assim como Fan *et al.* (2016), foi obtido a temperatura em função do tempo para 4 pontos distribuídos na seção transversal, como mostra a Figura 18.



**Figura 18 - Pontos de obtenção da temperatura na seção transversal (Fonte: Fan *et al.*, 2016).**

Para cada amostra, foi gerada uma curva de temperatura em função do tempo, comparando os dados obtidos experimentalmente com a curva de fogo do forno e a curva padrão ISO 834, conforme ilustrado na Figura 19.



**Figura 19 - Comparação numérica com experimental das curvas de temperaturas nos quatro pontos das seções em função do tempo das amostras: (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4, (e) B5 e (f) B6.**

É possível verificar que o comportamento das curvas numéricas é superior ao experimental, isso foi devido ao processo de simulação no qual foi feito com as informações do trabalho de Fan *et al.* (2016), no qual não foi possível obter uma simulação igual ao experimento realizado.

O processo foi considerado adiabático na parte superior da viga, enquanto o experimento realizado era composto por uma lã de rocha para o isolamento, assim o programa ANSYS aplica uma única condição adiabática de transferência de calor por condução térmica do material e desconsidera a transferência de calor pelo meio para a parte superior, causando uma discrepância nos resultados térmicos.

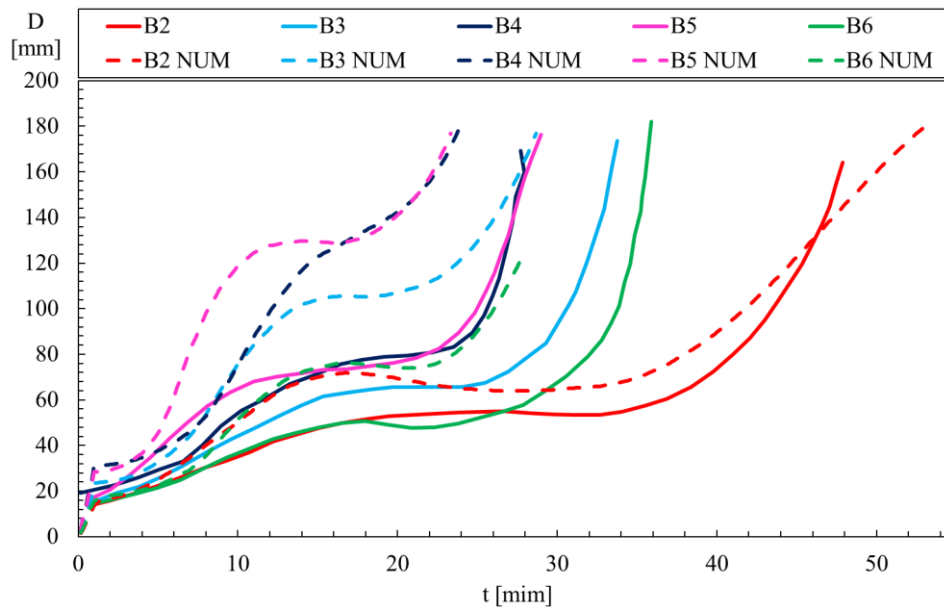
Outro fator que influenciou para esta diferença, é que no processo experimental foi determinada a média entre os termopares da parte central da viga e as demais nas extremidades. Na amostra real do experimento a viga é aquecida por três lados num forno,

e o calor é distribuído na viga de uma maneira diferente ao qual o programa trabalha. As temperaturas do centro da viga vão ser maiores que as temperaturas da extremidade, apesar do isolamento do forno ainda assim é uma diferença considerável. Como o programa ANSYS aplica as condições uniformes para toda a área delimitada de ação ao fogo, isso torna as temperaturas muito superiores as obtidas por Fan *et al.* (2016), como mostra a Tabela 7, que possui a raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre os dados experimentais e numéricos.

**Tabela 7 - Tabela do RMSE para os valores térmicos ao longo do tempo experimentais e numéricos.**

Amostra	Pontos de coleta de temperatura			
	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]
<b>B1</b>	39.09	125.59	124.62	97.28
<b>B2</b>	49.63	139.68	127.44	65.45
<b>B3</b>	69.34	179.04	179.45	123.24
<b>B4</b>	36.81	168.86	150.52	127.86
<b>B5</b>	86.65	181.37	170.41	136.67
<b>B6</b>	116.02	185.09	147.31	130.00

Para a validação do modelo termomecânico, um dos pontos mais importante é a análise da curva deslocamento do eixo y (D) em função do tempo, que nos fornece o tempo máximo que cada amostra suportou as análises em condições de carga constante e temperatura variando no tempo (Figura 20).



**Figura 20 - Gráfico comparando as simulações termomecânicas com os dados experimentais.**

Como pode ser observado na Figura 20, o modelo numérico apresenta uma diferença significativa entre as amostras B3 à B6, isso acontece pelo fato explicado anteriormente na validação térmica do modelo. Apesar disso a amostra B2 apresentou uma curva muito semelhante ao experimental. As curvas da amostra B1 não são contabilizadas para a validação por motivos de não apresentarem dados experimentais. O RMSE para esta análise está descrito na Tabela 8.

**Tabela 8 - Tabela do RMSE para os valores de deslocamento máximo no eixo y ao longo do tempo experimentais e numéricos.**

Amostra	D [mm]
B2	13.4
B3	44.6
B4	49.1
B5	52.0
B6	27.3

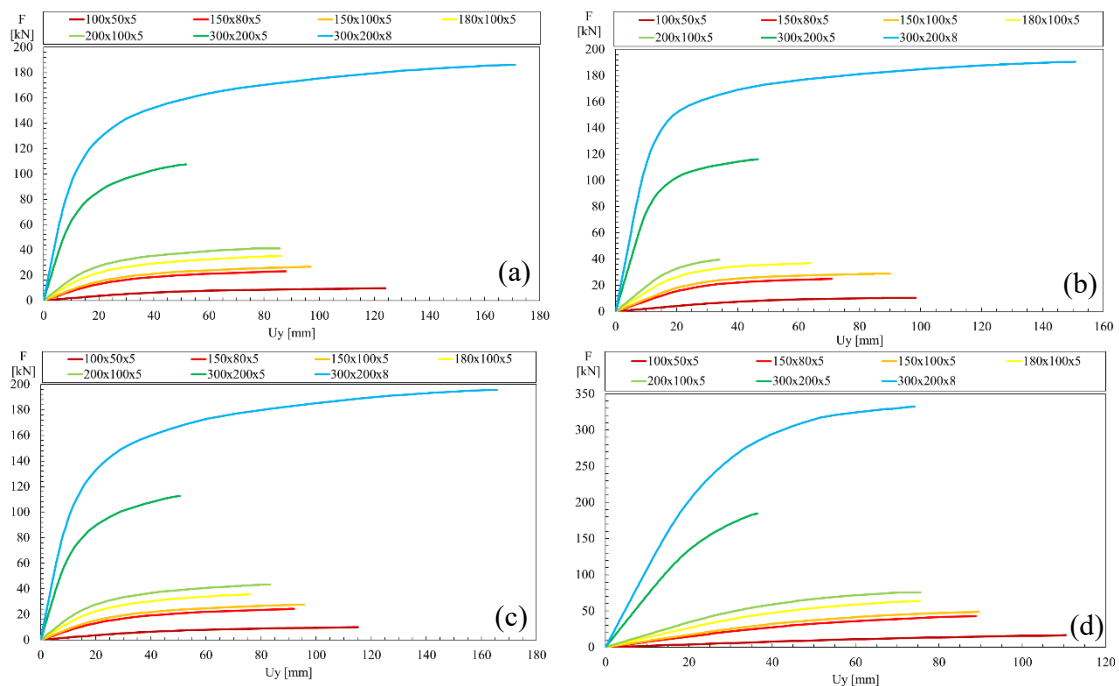
Durante o processo de análise da validação termomecânicas, é possível verificar que todas as amostras apresentaram seu modo de falha de flexão no plano, apesar da instabilidade das seções, assim como os resultados experimentais. Isso ocorre porque o modelo apresenta enrijecedores em 4 pontos da viga, conforme foi apresentado na Figura 6, utilizados principalmente para não acontecer a flambagem nas seções transversais.

As imagens das simulações para cada amostra estão apresentadas no Anexo B.

## 6.2. Estudo Paramétrico

Assim como a validação experimental, o estudo paramétrico inclui resultados das análises estática, térmica e termomecânica, sendo dividido em duas etapas principais. A primeira etapa compara diferentes tipos de seções utilizando o mesmo material, enquanto a segunda avalia uma mesma seção variando o material. Na análise estática, são apresentados os valores da força máxima suportada por cada combinação de seção transversal e material.

Analisando inicialmente a resistência de cada seção no mesmo material (Figura 21).



**Figura 21 - Comparação da resistência à temperatura ambiente das seções transversais para cada material a) austenítico 1.4301, b) ferrítico 1.4016, c) austenítico 1.4571 e d) duplex 1.4462.**

É possível verificar que todos os gráficos apresentam uma resistência da seção conforme é variado o tamanho de largura, altura ou espessura (Figura 21). Comparando as seções de mesma altura e variando a sua largura, como o caso das seções RHS 150x80x5 e RHS 150x100x5 (Figura 21), nota-se um pequeno aumento na resistência das seções. Quando foi variado a espessura como o caso das seções transversais 300x200x5 e 300x200x8 obteve-se um grande aumento tanto na força máxima suportada quanto no

deslocamento máximo por conta de apresentar uma melhor distribuição da força sobre a viga (Abdelrahman *et al.*, 2020).

Quando variado a altura da seção, entre as seções 150x100x5 e 180x100x5, verificou-se que a força máxima suportada pela seção transversal apresentou um salto significativo, representando um aumento de 30% a mais. Por outro lado, o deslocamento máximo obtido diminuiu em 10% para o aço inoxidável austenítico 1.4301 e 28% para o aço inoxidável ferrítico 1.4016. Esses resultados foram obtidos a partir dos dados da Tabela 9, na qual apresenta os dados de força máxima suportada por cada seção e seu deslocamento máximo atingido pela convergência do *software* (Fan *et al.*, 2019).

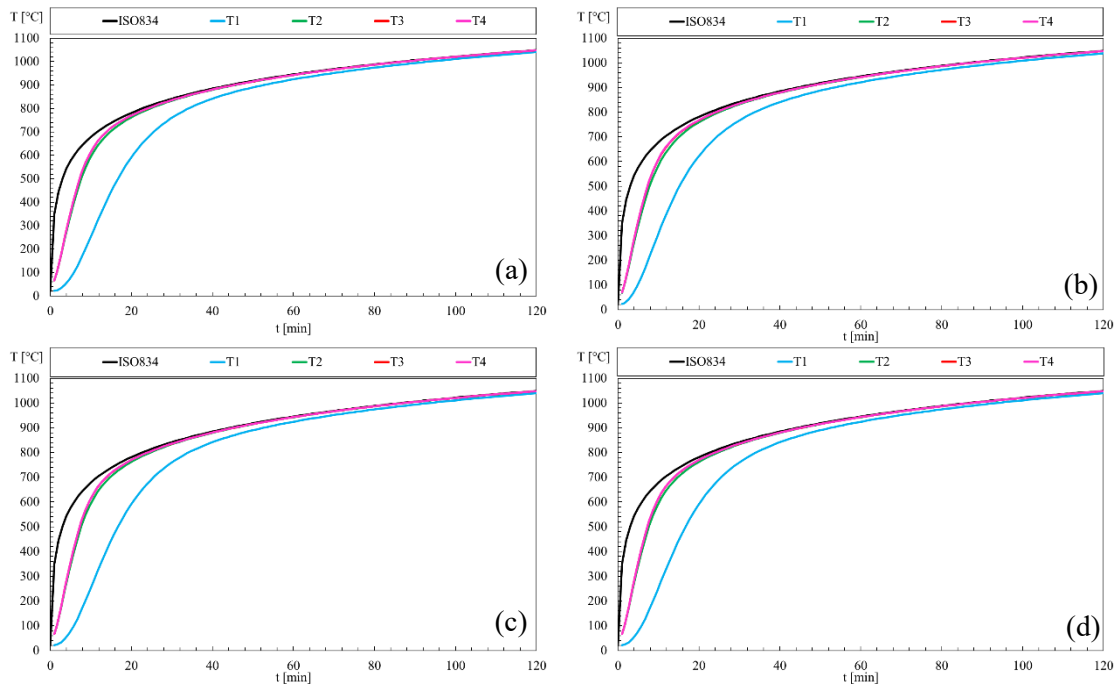
**Tabela 9 - Força máxima e deslocamento à temperatura ambiente suportada por cada seção transversal de viga nos diferentes aços inoxidáveis.**

Seção	Material	Força máxima NUM [kN]	Deslocamento máximo na direção y [mm]
100x50x5	1.4301	9.71	124.03
	1.4016	10.32	96.82
	1.4571	9.90	115.20
	1.4462	16.44	110.40
150x80x5	1.4301	23.18	87.86
	1.4016	24.85	70.86
	1.4571	24.24	91.91
	1.4462	42.85	88.87
150x100x5	1.4301	26.64	96.81
	1.4016	28.74	90.00
	1.4571	27.63	95.59
	1.4462	48.87	88.26
180x100x5	1.4301	35.04	86.29
	1.4016	37.00	63.97
	1.4571	35.85	76.09
	1.4462	63.99	74.99
200x100x5	1.4301	41.20	85.73
	1.4016	44.68	75.72
	1.4571	43.22	83.32
	1.4462	75.36	75.47
300x200x5	1.4301	107.44	51.57
	1.4016	116.08	46.66
	1.4571	112.62	50.64
	1.4462	184.26	36.48
300x200x8	1.4301	186.14	171.03
	1.4016	190.50	150.67
	1.4571	195.64	165.74
	1.4462	332.46	74.12

É possível observar que o aumento das dimensões geométricas da seção resulta em maior resistência à flexão. Além disso, os diferentes tipos de aço inoxidável exibem comportamentos mecânicos distintos: o material austenítico 1.4301 apresentou a menor resistência máxima em todas as seções transversais, enquanto o duplex 1.4462 demonstrou a maior resistência. No entanto, o aço duplex 1.4462 revelou uma menor ductibilidade, com deformações menores, conforme observado nas seções transversais

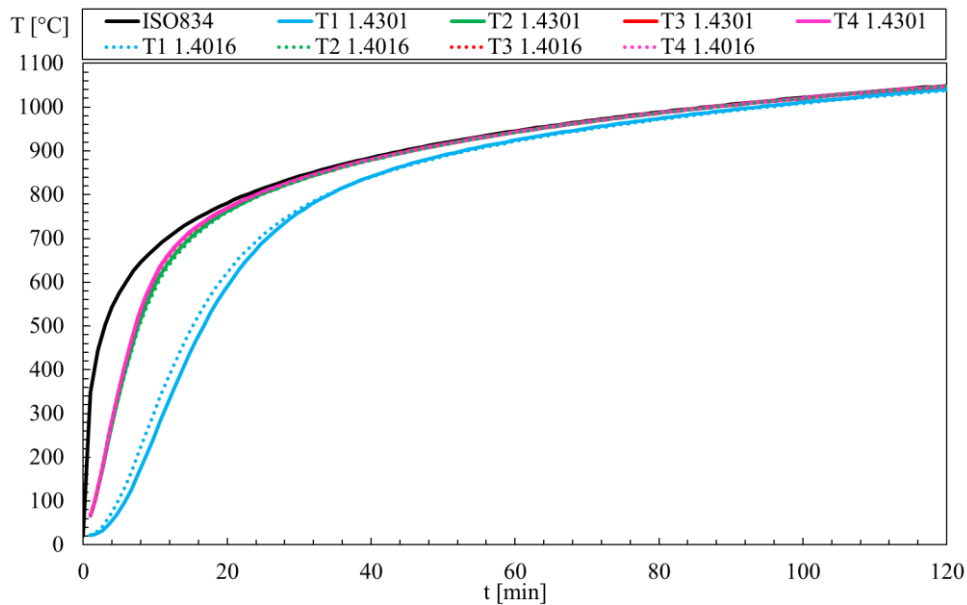
300x200x5 e 300x200x8. Esta menor ductibilidade pode ser atribuída às propriedades específicas do aço inoxidável duplex, em comparação com outros tipos de aço inoxidável (CEN, 2009).

Para as análises térmicas, os materiais austeníticos e duplex exibem o mesmo comportamento devido às suas propriedades térmicas serem iguais (CEN, 2023). Esse fenômeno pode ser observado na viga RHS 180x100x5, conforme ilustrado na Figura 22.



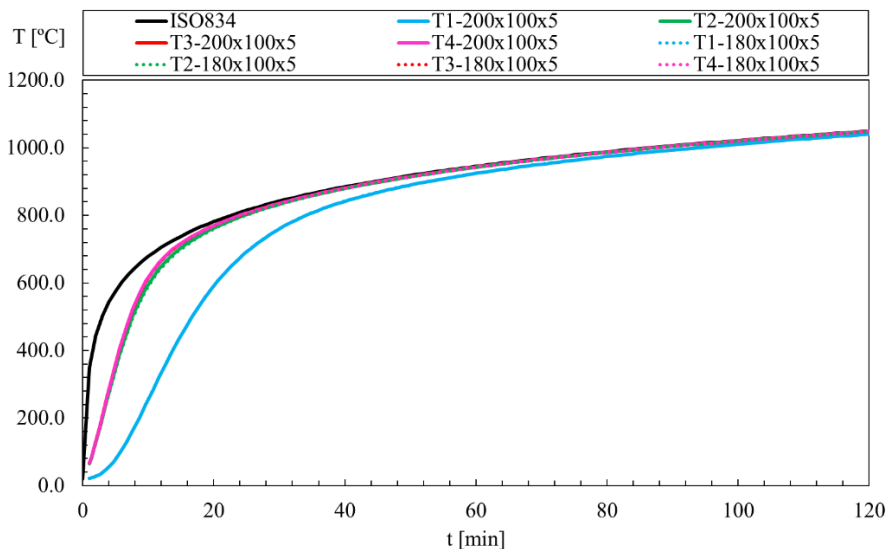
**Figura 22 - Dados térmicos seção RHS180x100x5 entre os materiais a) austenítico 1.4301 b) ferrítico 1.4016 c) austenítico 1.4571 d) duplex 1.4462.**

A Figura 22 também evidencia uma leve diferença no ponto de coleta T1, especialmente entre o aço ferrítico e os demais materiais, com o primeiro apresentando uma maior condução de calor (CEN, 2023). Essa discrepância torna-se ainda mais evidente na comparação direta apresentada na Figura 23.



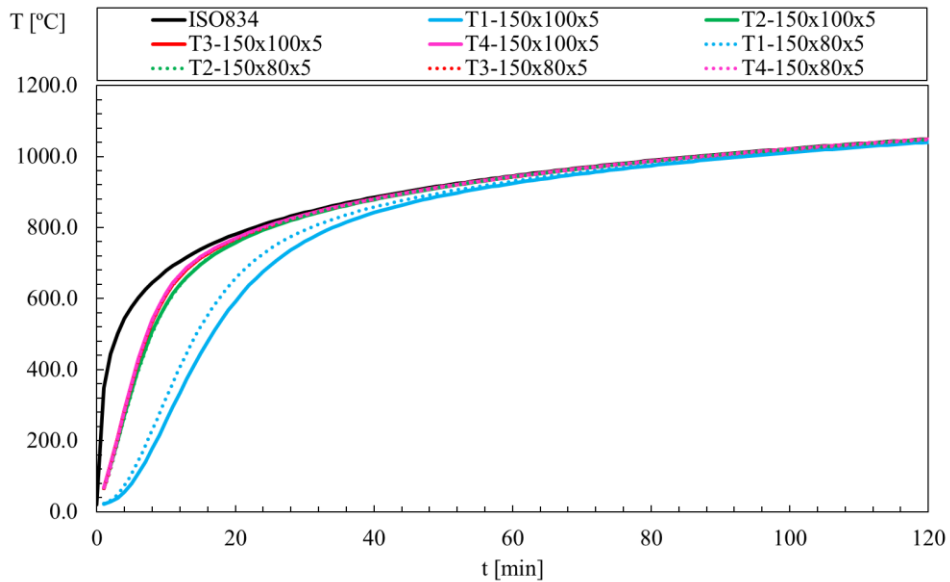
**Figura 23 – Comparação dos pontos T1, T2, T3 e T4 entre os materiais austenítico 1.4103 e ferrítico 1.4016 da seção RHS 180x100x5.**

Entre diferentes seções, observa-se uma variação significativa na distribuição da temperatura ao longo da seção. Ao considerar os três parâmetros geométricos (altura, largura e espessura), nota-se que, com o aumento da altura da seção, as temperaturas nos pontos T1, T2, T3 e T4 permanecem praticamente inalteradas entre as diferentes seções. A Figura 24 ilustra a comparação entre as seções transversais RHS 200×100×5 e RHS 180×100×5.



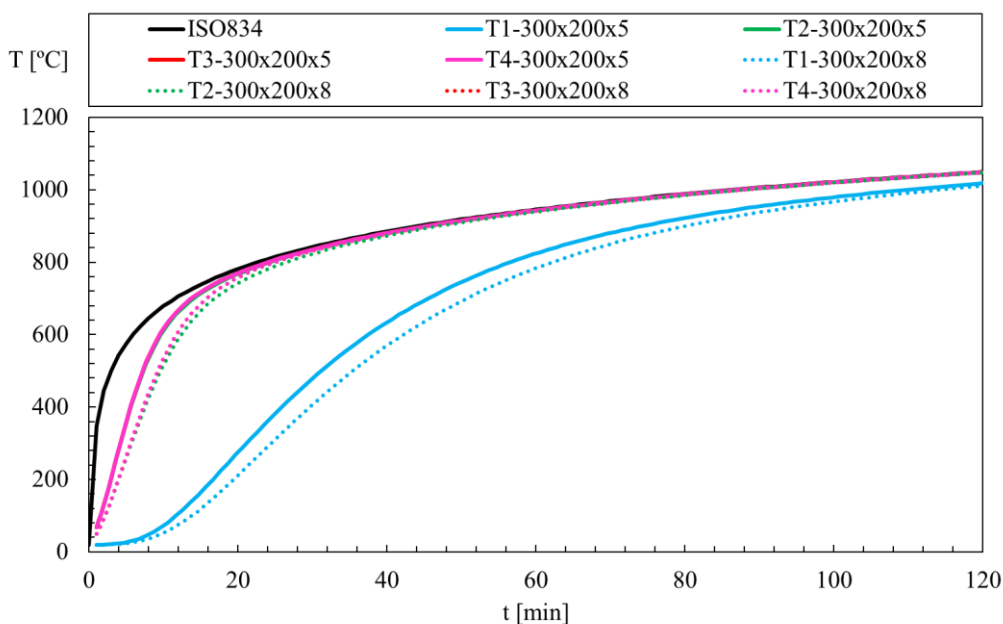
**Figura 24 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 200x100x5 e RHS 180x100x5, aço austenítico 1.4301.**

Mantendo a altura e a espessura da seção constantes e variando a largura, observa-se uma diferença significativa na temperatura no ponto T1, enquanto os pontos T2, T3 e T4 não apresentam variação, conforme ilustrado na Figura 25, na qual faz comparação entre as seções RHS 150x100x5 e RHS 150x80x5.



**Figura 25 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 150x100x5 e RHS 150x80x5, aço austenítico 1.4301.**

Ao utilizar diferentes espessuras, mantendo a altura e a largura constantes, observa-se que todos os pontos de temperatura apresentam valores menores nas seções com maior espessura. Esse comportamento pode ser visto na Figura 26, que compara as seções RHS 300x200x5 e RHS 300x200x8.



**Figura 26 - Comparação entre os pontos de captura térmica T1, T2, T3 e T4 entre as seções RHS 150x100x5 e RHS 150x80x5, aço austenítico 1.4301.**

Dessa forma, percebe-se que a largura e a espessura da seção influenciam a distribuição de temperatura na viga de maneira mais significativa do que a altura. Isso acontece por causa da distribuição da temperatura a partir de uma superfície maior (Abdulack, 2024). Os gráficos de todas as seções e materiais dos resultados das simulações térmicas, estão apresentados no Anexo C.

Para as análises paramétricas termomecânicas, as cargas máximas obtidas nas simulações estáticas foram aplicadas e distribuídas de acordo com a quantidade de nós de cada seção, considerando níveis carregamentos de  $n = 0.2, 0.4$  e  $0.6$  da carga máxima. O objetivo foi determinar o tempo final (resistência ao fogo) e a temperatura máxima em que a viga mantém sua integridade estrutural sob esse esforço, utilizando os critérios de paragem (Equações 4 e 5) ou encerrando a simulação em caso de não convergência do programa ANSYS. As Tabelas 10, 11 e 12 nos mostram o tempo de resistência ao fogo, determinado para cada seção da viga em função do material e carregamento.

**Tabela 10 - Tempo final (resistência ao fogo) e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas**

Seção	Material	Nível de Carga	D <sub>limite</sub> [mm]	(dD/dt) <sub>limite</sub> [mm/min]	Critério 1	Critério 2	t <sub>fi</sub> [min]	T <sub>máx</sub> [°C]
100x50x5	1.4301	0.2	324	14.4	-	-	46.50	904
		0.4			-	23.00	25.23	808
		0.6			-	-	11.00	641
	1.4016	0.2			-	-	17.00	737
		0.4			-	-	11.83	655
		0.6			-	-	10.17	611
	1.4571	0.2			-	-	84.17	994
		0.4			-	-	43.33	893
		0.6			-	28.88	39.20	817
	1.4462	0.2			-	-	31.33	842
		0.4			-	-	16.67	736
		0.6			-	11.50	12.33	671
150x80x5	1.4301	0.2	216	9.6	-	51.83	52.67	923
		0.4			-	-	25.00	806
		0.6			-	-	14.50	710
	1.4016	0.2			-	-	20.50	772
		0.4			-	-	13.00	682
		0.6			-	-	10.33	621
	1.4571	0.2			-	86.67	86.67	998
		0.4			-	-	47.17	906
		0.6			-	-	29.67	835
	1.4462	0.2			-	-	32.83	850
		0.4			-	-	17.22	745
		0.6			-	-	10.33	652
150x100x5	1.4301	0.2	216	9.6	-	52.17	52.83	923
		0.4			-	-	26.55	817
		0.6			-	14.00	14.67	713
	1.4016	0.2			-	-	22.00	784
		0.4			-	-	13.17	686
		0.6			-	-	10.17	618
	1.4571	0.2			-	-	86.83	999
		0.4			-	-	47.83	908
		0.6			-	30.00	30.88	841
	1.4462	0.2			-	-	33.67	854
		0.4			-	-	18.17	753
		0.6			-	-	10.17	622

**Tabela 11 - Tempo final e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas**

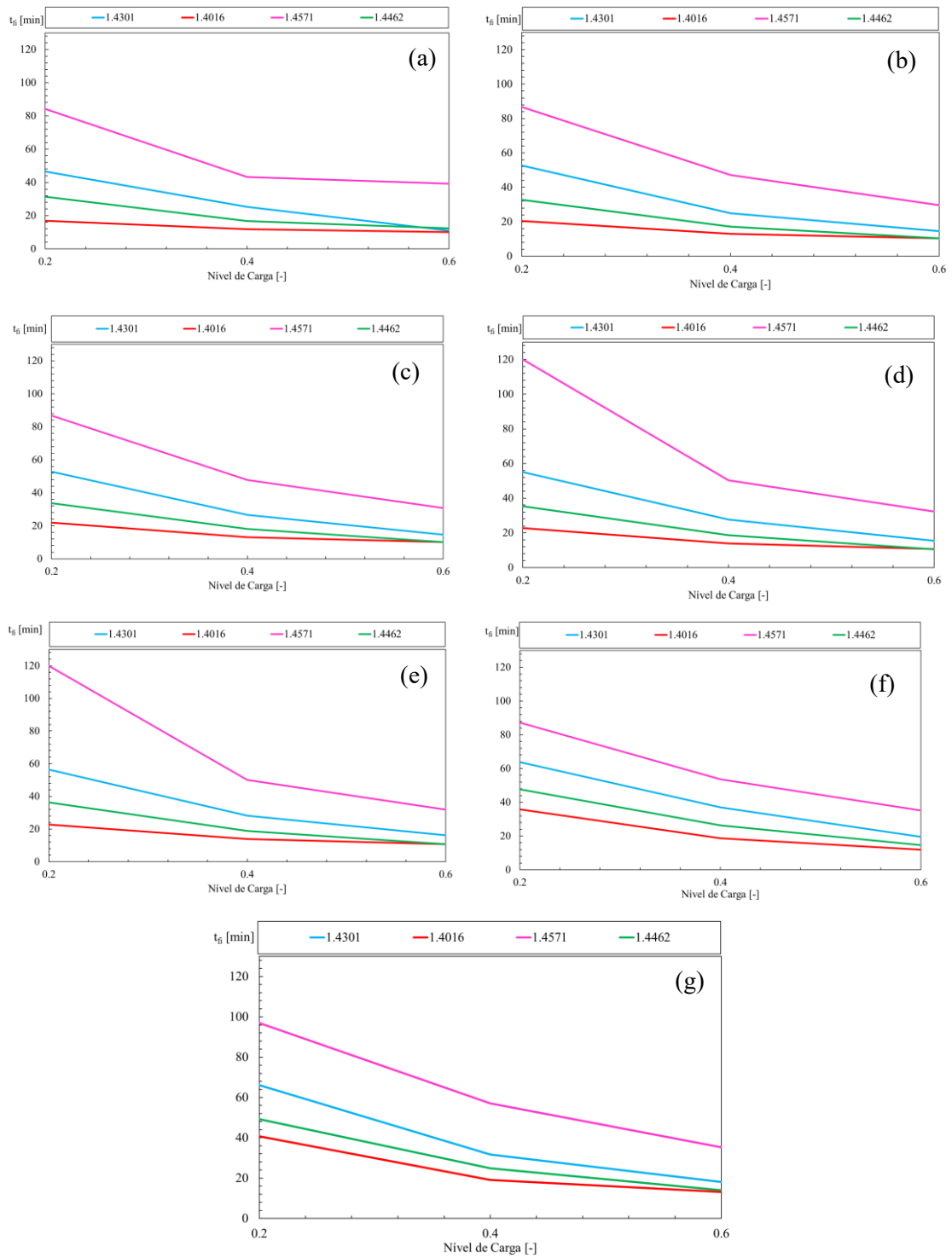
Seção	Material	Nível de Carga	D <sub>limite</sub> [mm]	(dD/dt) <sub>limite</sub> [mm/min]	Critério 1	Critério 2	t <sub>fi</sub> [min]	T <sub>máx</sub> [°C]
180x100x5	1.4301	0.2	180	8	-	51.67	55.00	929
		0.4			-	26.83	27.67	823
		0.6			-	13.67	15.50	724
	1.4016	0.2			-	-	22.83	790
		0.4			-	-	13.88	700
		0.6			-	-	10.67	632
	1.4571	0.2			-	87.17	120.00	1048
		0.4			-	48.00	50.33	916
		0.6			-	30.00	32.33	847
	1.4462	0.2			-	-	35.33	861
		0.4			-	-	18.67	758
		0.6			-	-	10.50	631
200x100x5	1.4301	0.2	162	7.2	-	51.33	56.50	933
		0.4			-	26.50	28.17	825
		0.6			-	13.33	16.17	732
	1.4016	0.2			-	-	22.67	789
		0.4			-	-	13.83	697
		0.6			-	-	10.83	667
	1.4571	0.2			-	85.33	120.00	1047
		0.4			-	46.50	50.00	915
		0.6			-	28.17	31.83	845
	1.4462	0.2			-	35.50	36.38	866
		0.4			-	-	18.83	759
		0.6			-	-	10.83	641
300x200x5	1.4301	0.2	108	4.8	-	59.67	63.83	952
		0.4			-	27.33	37.00	868
		0.6			-	12.67	19.50	765
	1.4016	0.2			-	31.17	35.83	863
		0.4			-	16.00	18.67	756
		0.6			-	-	12.00	663
	1.4571	0.2			-	-	87.33	1000
		0.4			-	51.83	53.67	926
		0.6			-	23.33	35.17	860
	1.4462	0.2			-	44.33	47.73	897
		0.4			-	18.33	26.33	816
		0.6			-	11.00	14.67	713

**Tabela 12 - Tempo final e temperatura crítica das simulações paramétricas termomecânicas**

Seção	Material	Nível de Carga	D <sub>limite</sub> [mm]	(dD/dt) <sub>limite</sub> [mm/min]	Critério 1	Critério 2	t <sub>fi</sub> [min]	T <sub>máx</sub> [°C]
300x200x8	1.4301	0.2	108	4.8	-	54.83	66.17	926
		0.4			-	14.00	31.67	723
		0.6			-	9.33	18.17	500
	1.4016	0.2			-	26.83	40.83	814
		0.4			-	15.33	19.17	687
		0.6			-	12.17	13.17	611
	1.4571	0.2			-	85.17	97.00	994
		0.4			-	45.00	57.17	895
		0.6			-	12.50	35.33	806
1.4462	0.2	-	40.67	49.33	879			
	0.4	-	16.67	25.00	711			
	0.6	-	11.33	14.00	583			

Como é possível verificar tanto pelos dados das Tabelas 10, 11 e 12 quanto os gráficos apresentados no Anexo C, o aço inoxidável austenítico 1.4571 apresentou o maior tempo de resistência sob carga em todas as seções, enquanto o aço inoxidável ferrítico 1.4016 apresentou o menor tempo de resistência. Essa diferença de desempenho é atribuída à composição química dos materiais: o austenítico 1.4571 possui um alto teor de níquel, o que lhe confere excelente resistência mecânica, especialmente em altas temperaturas, justificando sua superior durabilidade sob carga. Por outro lado, o ferrítico 1.4016 não contém níquel, resultando em menor resistência mecânica e, conseqüentemente, menor capacidade de suportar as cargas aplicadas em comparação com o austenítico 1.4571 (Ala-Outinen, 1996).

A Figura 27 apresenta os dados finais da simulação realizada no programa ANSYS, demonstrando que, à medida que o nível de carga aumenta, o tempo de resistência diminui. A convergência do tempo de resistência tende a se aproximar para elevados níveis de carga, para os materiais 1.4301, 1.4016 e 1.4462, enquanto o aço 1.4571 apresenta um tempo de resistência sempre maior para o nível de carga 0.6 e para os restantes.



**Figura 27 - Gráfico do tempo de simulação do ANSYS em função do nível de carregamento: (a)100x50x5, (b)150x80x5, (c)150x100x5, (d)180x100x5, (e)200x100x5, (f)300x200x5 e (g)300x200x8.**

## 7. CONCLUSÕES

O programa ANSYS apresentou uma boa convergência de resultados na validação do modelo experimental utilizado. A simulação termomecânica para a amostra B2 mostrou uma aproximação satisfatória, apesar das limitações enfrentadas na modelagem do experimento para o modelo numérico. Por exemplo, não foi possível reproduzir integralmente o experimento realizado por Fan *et al.* (2016). No entanto, com os dados disponíveis, foi possível alcançar um resultado coerente.

As análises paramétricas evidenciaram que o material com melhor resistência mecânica sob condição de fogo foi o aço inoxidável austenítico 1.4751, destacando-se pela sua estabilidade estrutural e desempenho superior em altas temperaturas. De acordo com estudos, esse comportamento é atribuído à sua composição química, especialmente ao elevado teor de níquel, que contribui para a manutenção da resistência mecânica mesmo sob calor intenso. Em contraste, o aço inoxidável 1.4016 apresentou a menor resistência a altas temperaturas. Esse desempenho inferior deve-se à sua menor concentração de níquel e à acentuada queda nos seus fatores de redução entre 500 e 600 °C, o que resulta em uma perda significativa de capacidade de carga nessas condições. Esses resultados destacam a importância da escolha adequada do tipo de aço inoxidável para aplicações estruturais sujeitas a altas temperaturas.

Em relação aos fatores geométricos analisados, os resultados térmicos mostraram que o aumento da espessura e da largura causou uma diferença significativa na distribuição de temperatura ao longo do tempo na viga. Isso ocorre devido à condução térmica, já que um maior volume de material dificulta a propagação do calor, resultando em um aquecimento mais lento. Nas análises estáticas, verificou-se um aumento na resistência a 20 °C com o aumento da altura, largura e espessura das seções transversais. Para as análises termomecânicas, esse aumento de resistência também foi observado, porém de forma menos evidente. Isso ocorre porque as simulações consideram a carga máxima suportada à temperatura ambiente, o que acaba dificultando a visualização do impacto do aumento desses parâmetros nas condições avaliadas.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Abdelrahman, A. A., Mohamed, N. A., & Eltaher, M. A. (2022). Static bending of perforated nanobeams including surface energy and microstructure effects. *Engineering with Computers*, 38(Suppl 1), 415-435. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01149-x>.
- Abdulack, S. A. (2024). Transferência de calor em geometria cilíndrica: uma abordagem interdisciplinar para um problema real. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 46, e20240258. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0258>.
- Ala-Outinen, T. (1996). Fire resistance of austenitic stainless steels Polarit 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571). Espoo 1996, Technical Researc Centre of Finland, VTT Tiedotteita -Meddelanden - Research Notes 1760. 34 p. + app. 30 p.
- Albuquerque, R. N. M., & Pitangueira, R. L. da S. (2018). Sistema gráfico interativo para ensino de análise estrutural através do método dos elementos finitos. *Revista de Ensino de Engenharia*, 37(1), 76-87. DOI: 10.5935/2236-0158.20180008.
- Arrais, F., Lopes, N., & Real, P. V. (2021). Resistência ao fogo de vigas-coluna com seções elíticas ocas esbeltas em aço inoxidável. 7as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos, 2as Jornadas de Proteção Civil, 214-222. ISBN: 978-989-54814-9-1.
- Azevedo, A. F. M. (2003). *Método dos Elementos Finitos*. 1ª Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azevedo, J. R. (2018). Comportamento ao fogo de seções transversais de vigas e pilares em aço inoxidável. [Dissertação de Mestrado]. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Camacho, J. S. (2013). *Estudo das vigas: flexão normal simples*. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento De Engenharia Civil.
- Cardoso, M. (2019). Elementos estruturais em aço inoxidável: aplicações e resistência ao fogo. [Dissertação de Mestrado]. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- CEN. (2002). *EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2006). *EN 1993-1-4: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2009). *EN 10088-4: Stainless Steels - Part 4: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes*. European Committee for Standardization.

- CEN. (2009). *EN 13501-2:2007: Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2020). *EN 1363-1:2012: Fire resistance tests - Part 1: General requirements*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2021). *prEN 1993-1-5: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2023). *FprEN 1993-1-2: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: Structural fire design*. European Committee for Standardization.
- Chiew, S. P., Jin, Y. F., & Lee, C. K. (2016). Residual stress distribution of roller bending of steel rectangular structural hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 119, 85-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.016>.
- Del Prete, I., Cefarelli, G., & Nigro, E. (2016). Application of criteria for selecting fire scenarios for structures within fire safety engineering approach. *Journal of Building Engineering*, 8, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.010>.
- Ding, R., Fan, S., Wu, M., & Li, Y. (2021). Numerical study on fire resistance of rectangular section stainless steel-concrete composite beam. *Fire Safety Journal*, 125, 103436. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103436>.
- Ellobody, E. (2012). Composite slim floor stainless steel beam construction exposed to different fires. *Engineering Structures*, 36, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.029>.
- Fan, S., Du, L., Li, S., Zhang, L., & Shi, K. (2019). Fire-resistance of RHS stainless steel beams with three faces exposed to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 284-295. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.022>.
- Fan, S., He, B., Xia, X., Gui, H., & Liu, M. (2016). Fire resistance of stainless steel beams with rectangular hollow section: Experimental investigation. *Fire safety journal*, 81, 17-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.013>.
- Figueiredo, P. J. F. (2018). *Segurança contra Incêndios em Edifícios de Centros Urbanos Antigos – Antigo Orfeão e o Centro Histórico de Viseu*. [Dissertação de Mestrado]. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Fusion House, 74 p.
- Gardner, L. (2005). The use of stainless steel in structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 45-55. <https://doi.org/10.1002/pse.190>.
- Gardner, L., & Baddoo, N. R. (2006). Fire testing and design of stainless steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), 532-543. [doi:10.1016/j.jcsr.2005.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.09.009).

- Gardner, L., & Theofanous, M. (2008). Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1207-1216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.003>.
- Gonçalves, N. D. F. (2007). Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturais. [Dissertação de Mestrado]. Departamento de Matemática Aplicada / Departamento de Matemática Pura Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- González-Estrada, O. A., Natarajan, S., & Graciano, C. (2017). Reconstrucción de tensiones para el método de elementos finitos con mallas poligonales. *Revista UIS Ingenierías*, 16(1), 23-34. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n1-2017003>.
- Hecke, M. B. (2010). *Método dos Elementos Finitos Aplicados à Engenharia de Estruturas*. 1ª Edição. Universidade Federal do Paraná.
- Hibbeler, R. C. (2013). *Análise das Estruturas*. 8ª Edição. Pearson Education do Brasil.
- Krause, M. J. (2023). Through Numerical Simulation to Scientific Knowledge. In *Measurement and Understanding in Science and Humanities: Interdisciplinary Approaches* (pp. 201-215). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Landesmann, A., & Mouço, D. L. (2007). Análise estrutural de um edifício de aço sob condições de incêndio. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, 60(2): 285-294. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000200011>.
- Lopes, N., Arrais, F., Vila Real, P., Alves, M., Mesquita, L., Piloto, P., & Pinho da Cruz, J. (2024). Fire resistance of austenitic stainless steel beams with rectangular hollow sections. *Fire and Materials*, 48(1), 79-92. DOI: 10.1002/fam.3167.
- Lopes, N., Manuel, M., Sousa, A. R., & Real, P. V. (2019). Parametric study on austenitic stainless steel beam-columns with hollow sections under fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.018>.
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. 2ª Edição. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Martins, A. D., Camotim, D., Goncalves, R., Lopes, N., & Real, P. V. (2022). Transversally loaded stainless steel beams under fire: Local/global behaviour, strength and design. *Journal of Constructional Steel Research*, 189, 107080. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107080>.
- Millstok Stainless. (2015). *Stainless Steel Sections Catalog*. Millstock Stainless Limited
- Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Pathak, K. K., & Chouhan, J. S. (2007). An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM). *Journal of materials processing technology*, 186(1-3), 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.026>.

- Peng, B., Zhang, Y., Zheng, Y., Wang, R., Fernandez-Rodriguez, E., Tang, Q., ... & Zang, W. (2022). The effects of surge motion on the dynamics and wake characteristics of a floating tidal stream turbine under free surface condition. *Energy Conversion and Management*, 266, 115816. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115816>.
- Real, P. V., Cazeli, R., da Silva, L. S., Santiago, A., & Piloto, E. P. (2004). The effect of residual stresses in the lateral-torsional buckling of steel I-beams at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3-5), 783-793. doi:10.1016/S0143-974X(03)00143-3.
- Real, P. V., Lopes, N., da Silva, L. S., & Franssen, J. M. (2008). Lateral-torsional buckling of stainless steel I-beams in case of fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1302-1309. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.013>.
- Reis, A. da S. (2011). Determinação de cenários de incêndio em edifícios. [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Renaud, C., & Zhao, B. (2009). Fire behaviour of steel-concrete composite members with austenitic stainless steel. *Advanced Steel Construction*, Vol. 5, No. 3, pp. 273-288.
- Rossi, B. (2014). Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability. *Thin-Walled Structures*, 83, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.021>.
- Thompson, M. K., Thompson, J. M. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Elsevier - Health Sciences Division.
- To, E. C. Y., & Young, B. (2008). Performance of cold-formed stainless steel tubular columns at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 30(7), 2012-2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.015>.
- Vitali, D. (2024). Desenvolvimento de planilha de cálculo para definição de vigas metálicas de frigoríficos. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo.
- Wu, M., Fan, S., Han, Y., Liang, D., & Xu, Q. (2023). Fire-resistant design of stainless steel-concrete composite beam considering slip of stud connector. *Thin-Walled Structures*, 186, 110713. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110713>.
- Xing, Z., Kucukler, M., & Gardner, L. (2021). Local buckling of stainless steel I-sections in fire: Finite element modelling and design. *Thin-Walled Structures*, 161, 107486. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107486>.

## ANEXO A

Nesta sessão, encontram-se as curvas de tensão-deformação para cada material. Sendo  $t$  a espessura das vigas em milímetros, para os dados paramétricos.

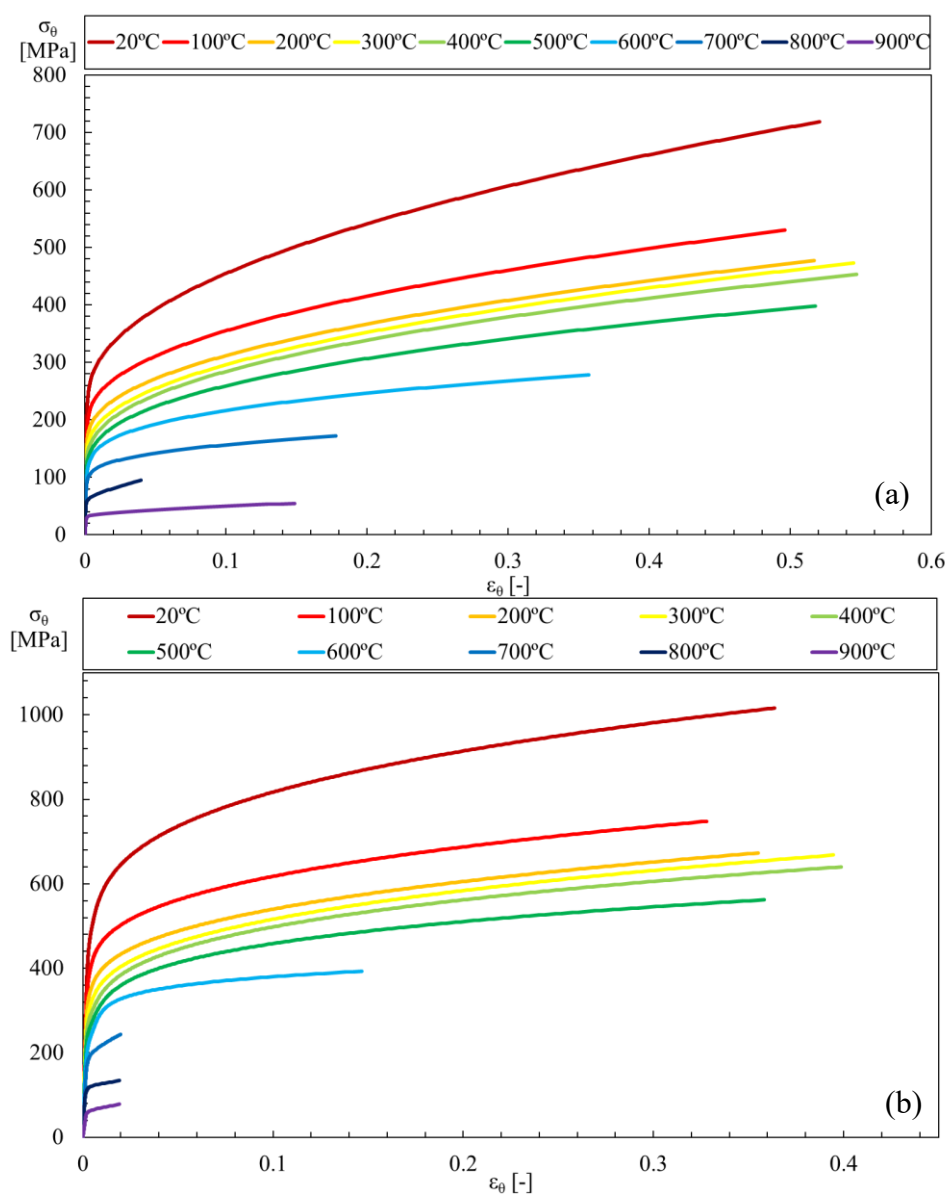


Figura A.1 – Gráficos do aço inoxidável S30408: (a) *flat* e (b) *corner*.

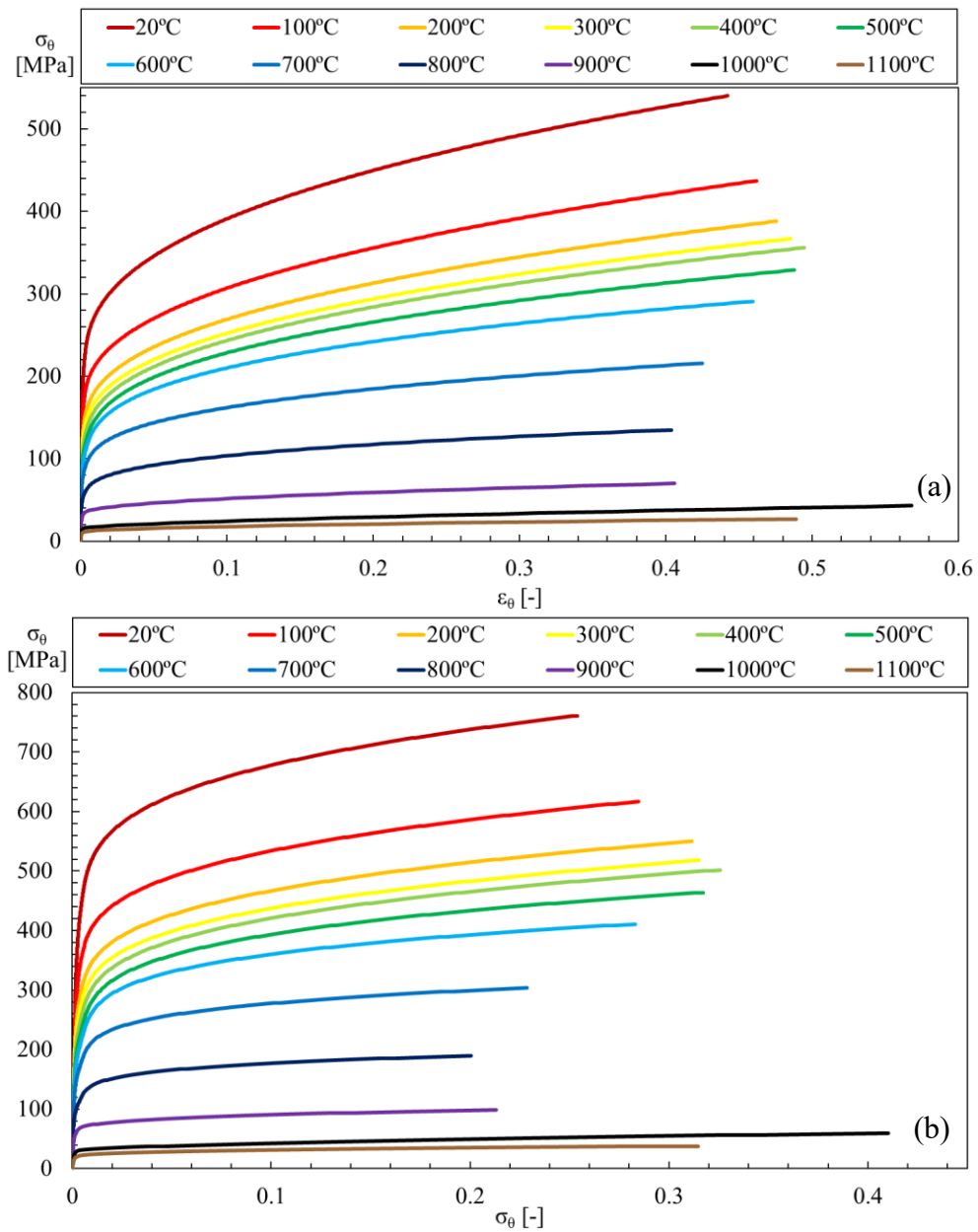


Figura A.2 – Gráficos do aço inoxidável 1.4103  $t \leq 6$ , (a) *flat* e (b) *corner*.

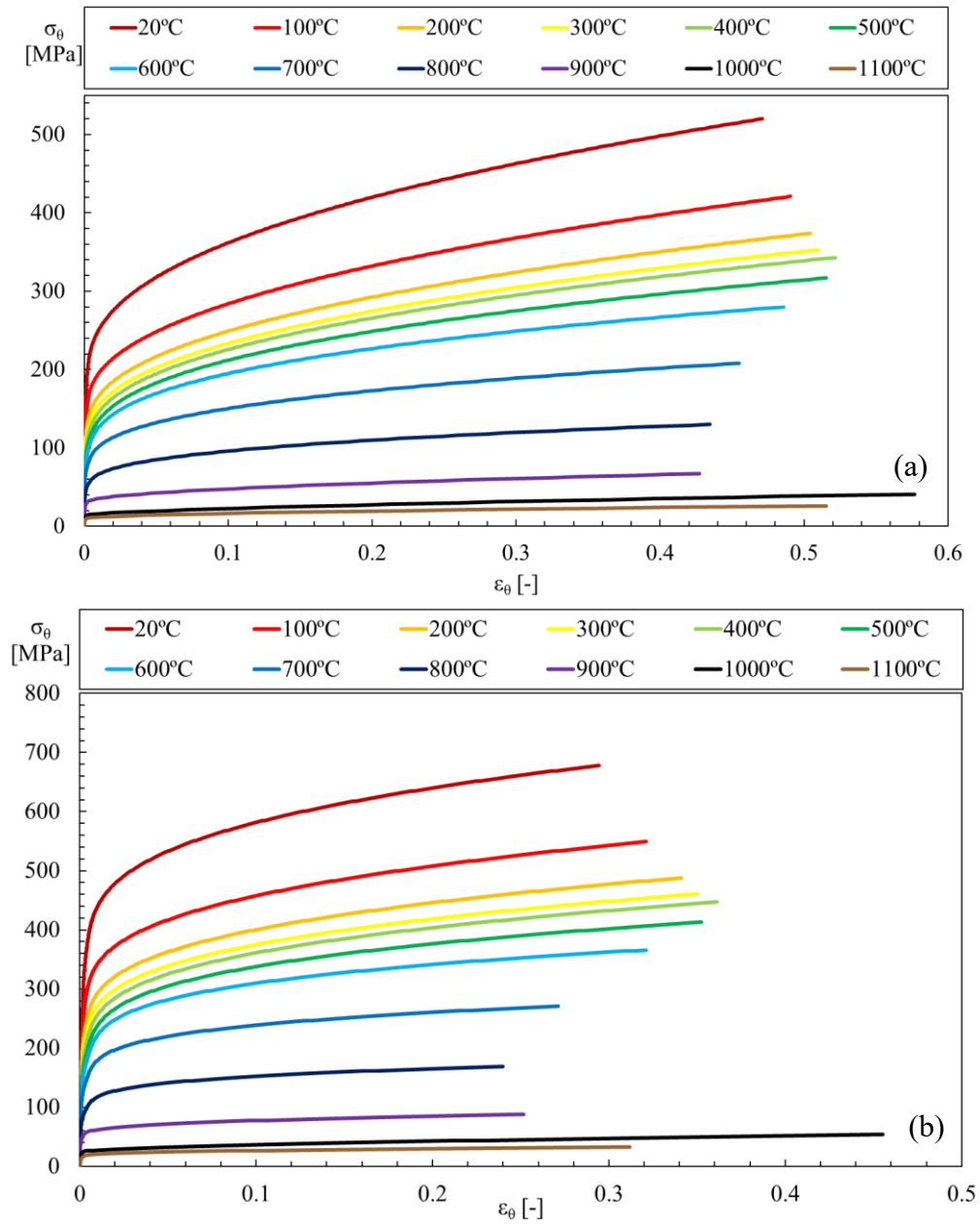


Figura A.3 – Gráficos do aço inoxidável 1.4103  $t \leq 12$ , (a) flat e (b) corner.

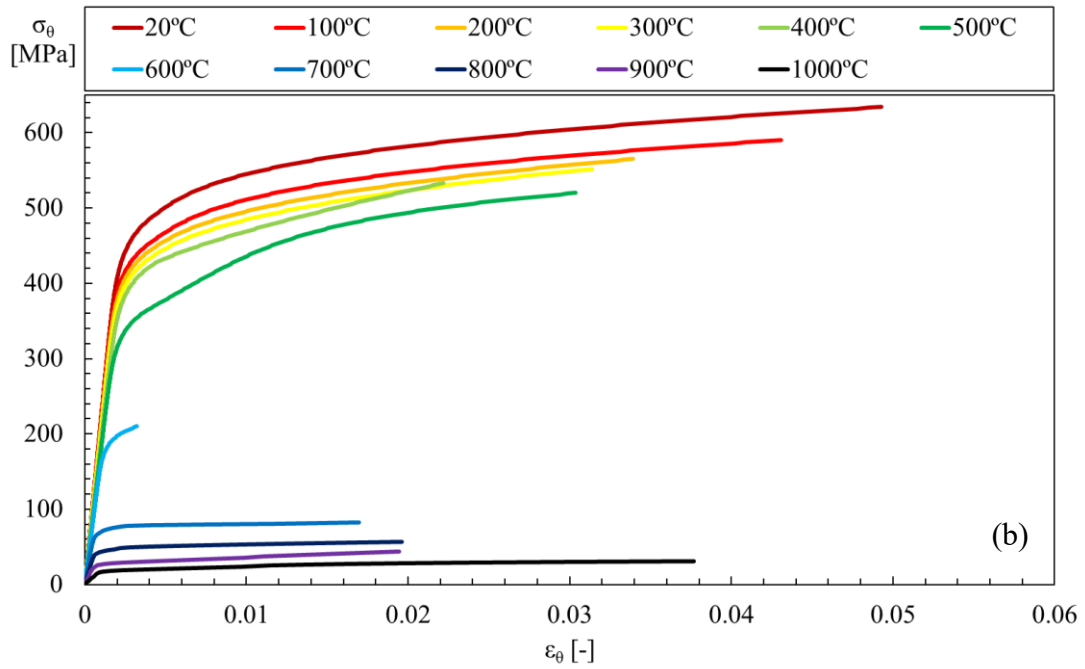
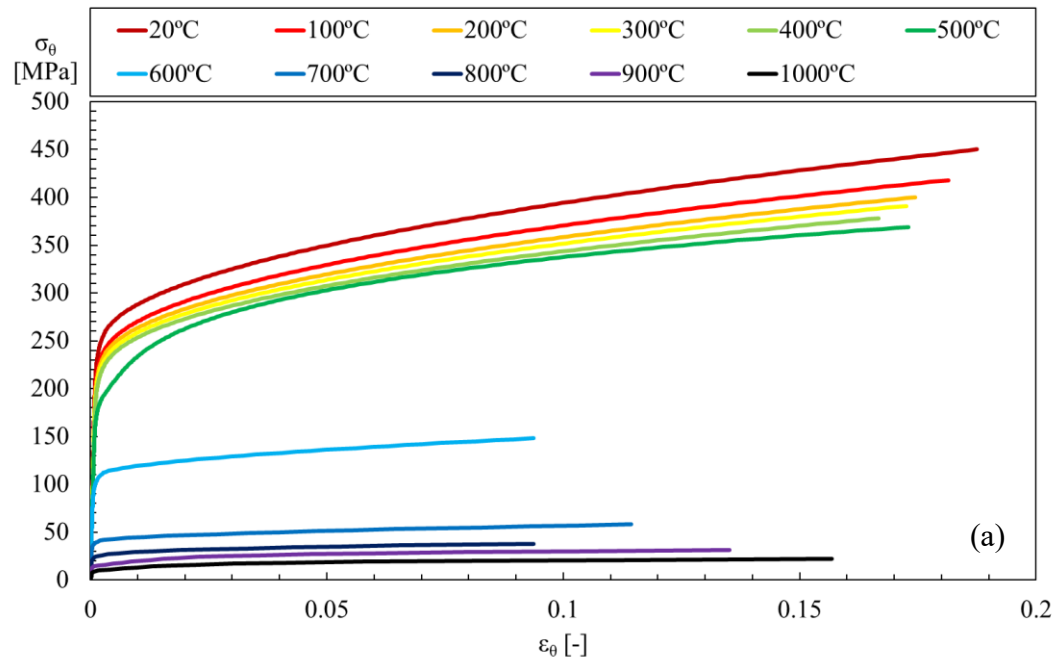


Figura A.4 - Gráficos do aço inoxidável 1.4016  $t \leq 6$ , (a) flat e (b) corner.

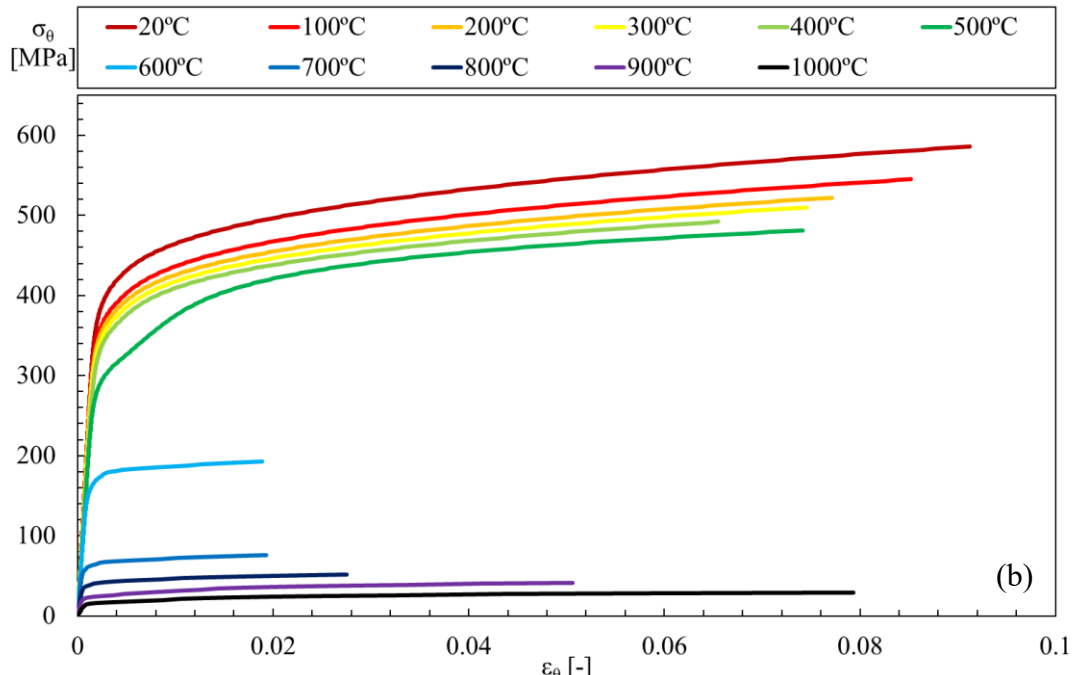
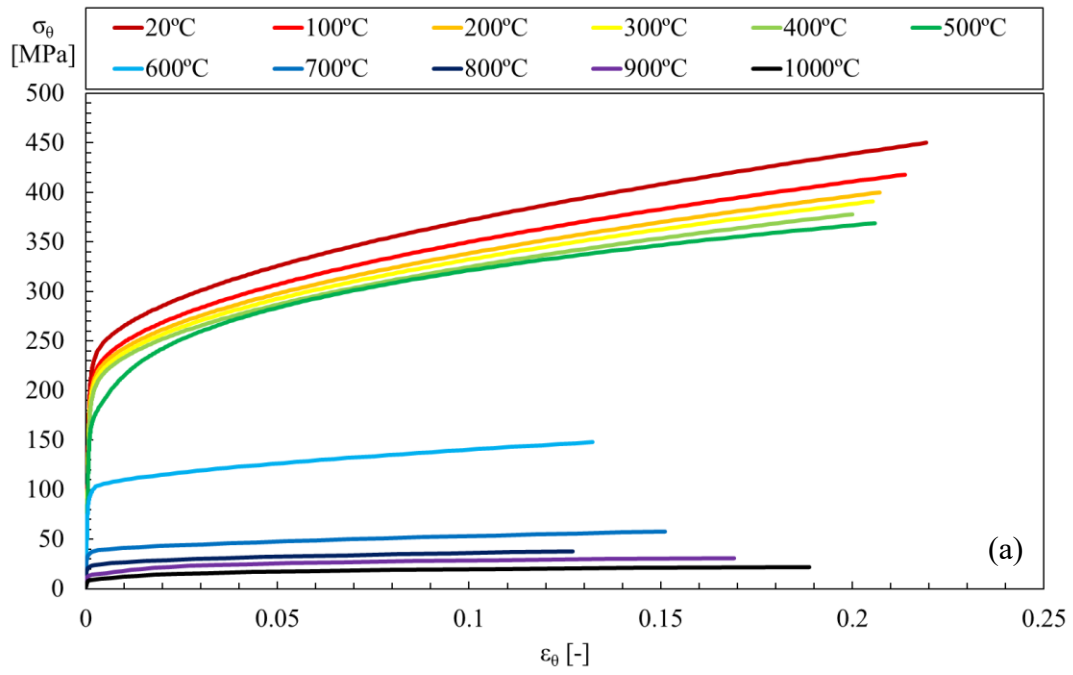


Figura A.5 - Gráficos do aço inoxidável 1.4016  $t \leq 12$ , (a) flat e (b) corner.

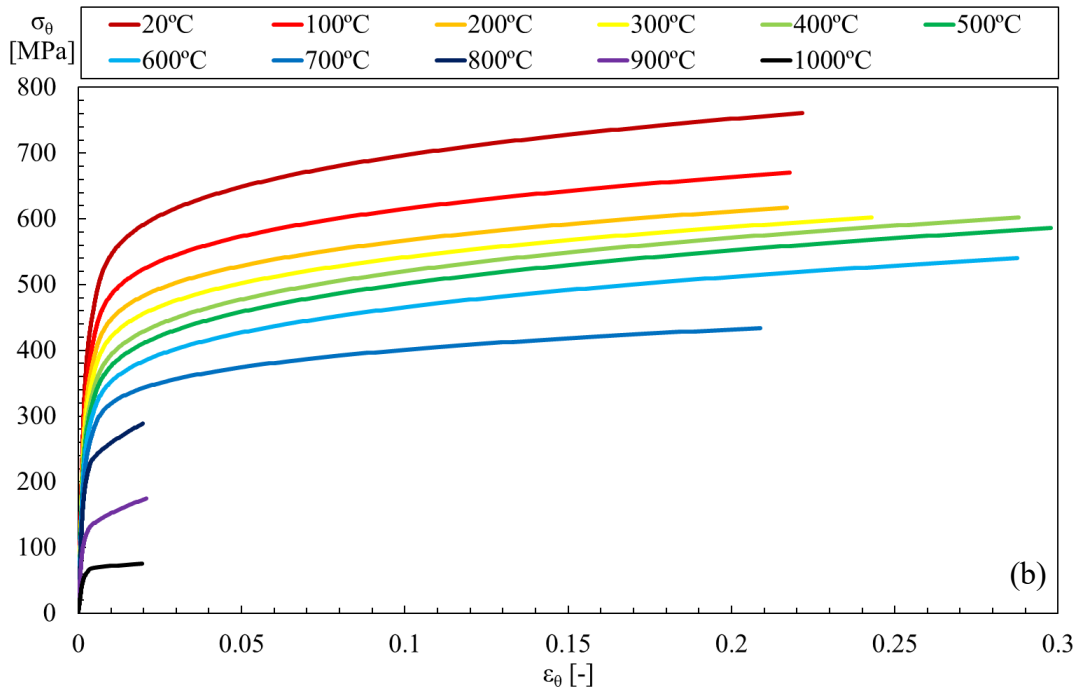
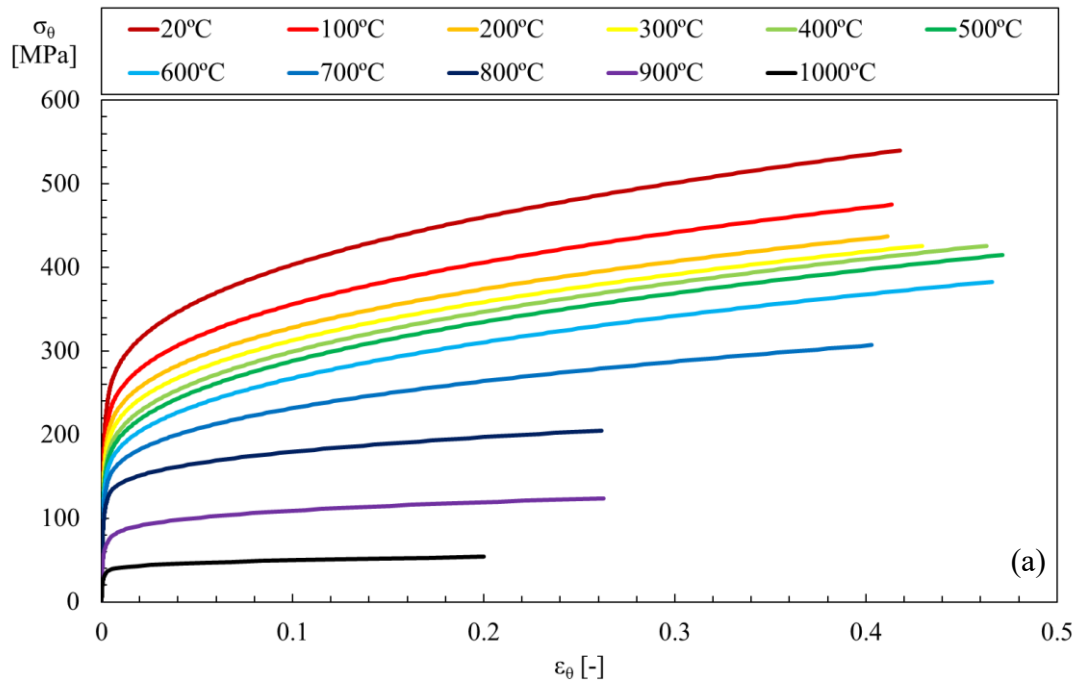


Figura A.6 – Gráficos do aço inoxidável 1.4571  $t \leq 6$ , (a) *flat* e (b) *corner*.

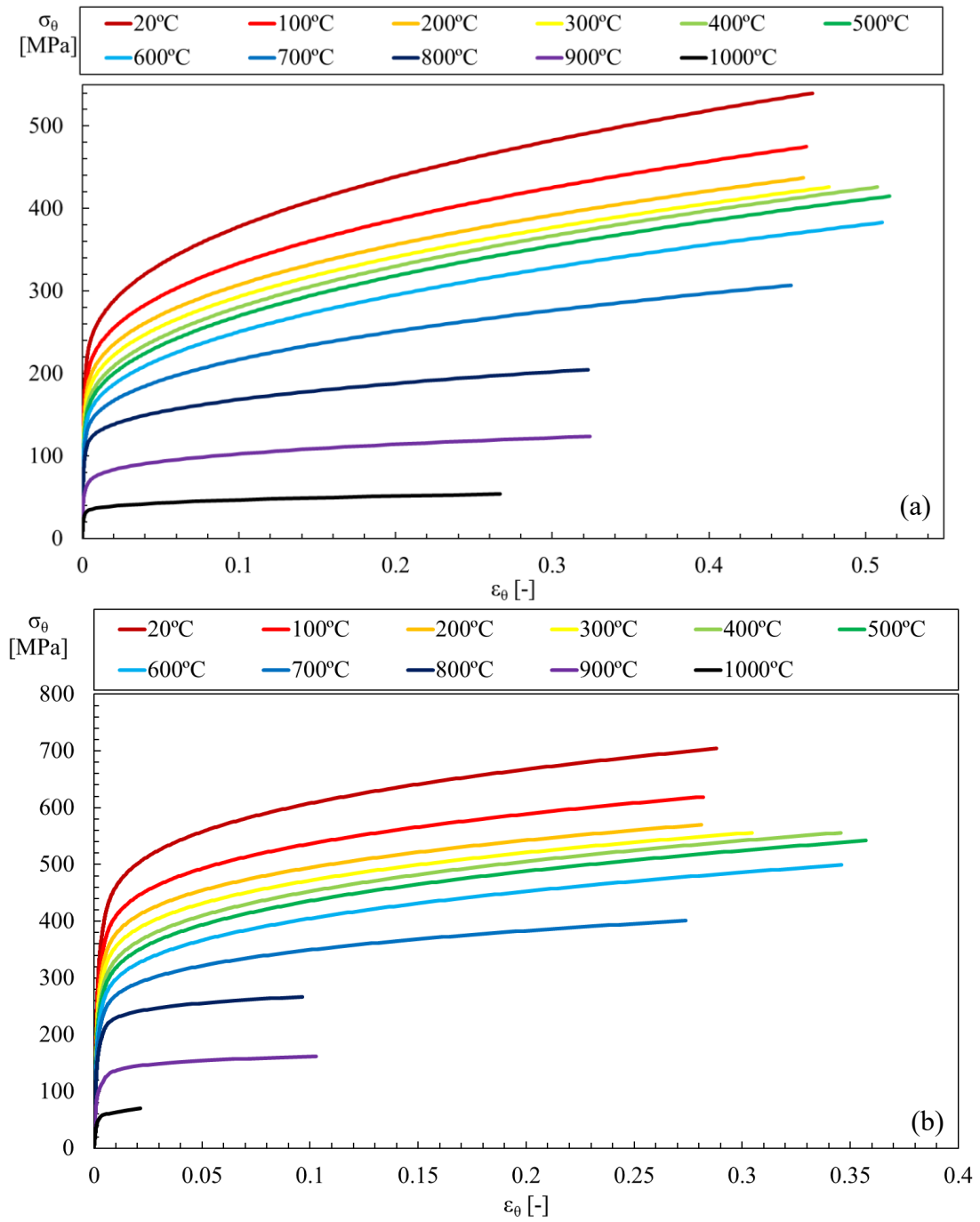


Figura A.7 - Gráficos do aço inoxidável 1.4571  $t \leq 12$ , (a) *flat* e (b) *corner*.

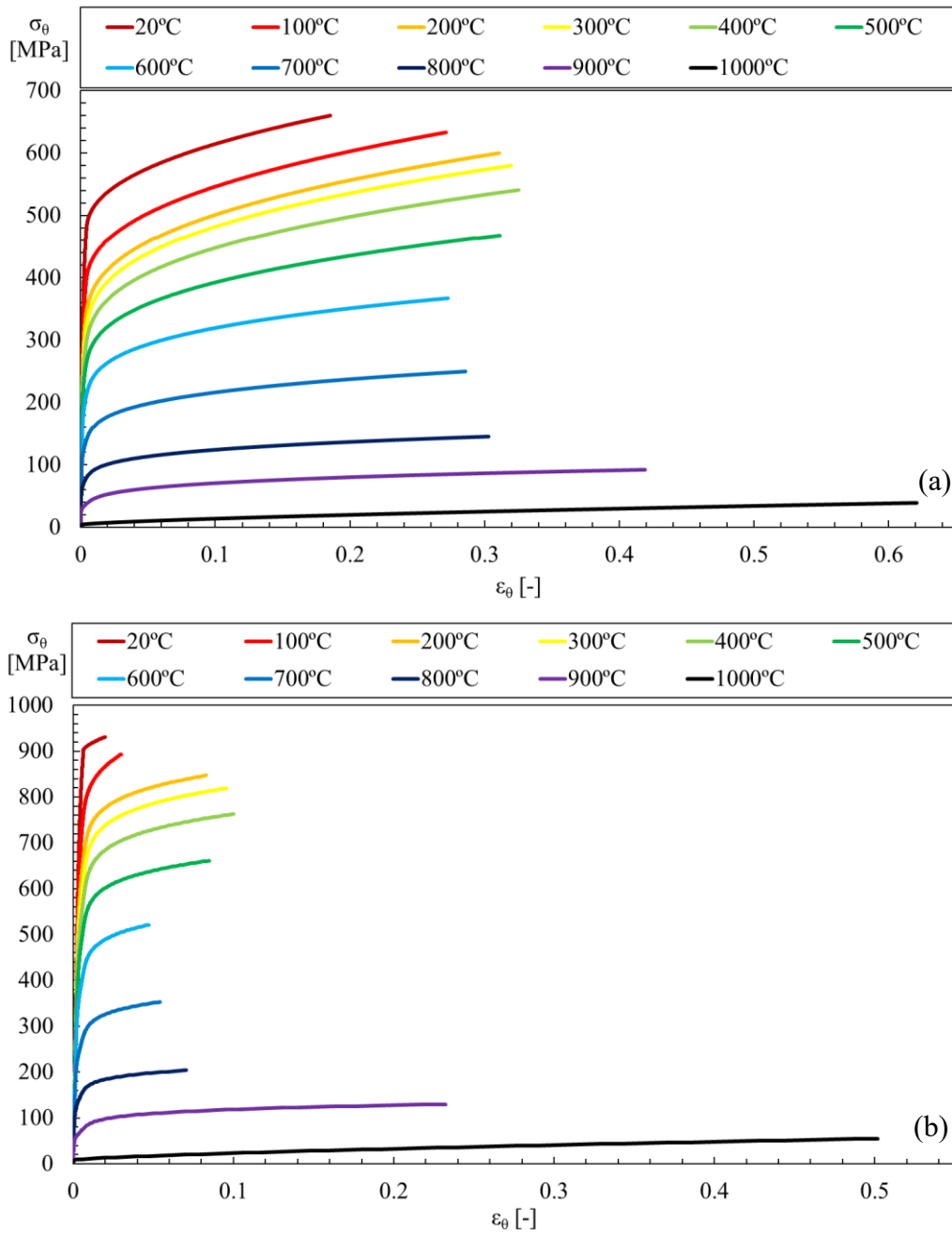


Figura A.8 - Gráficos do aço inoxidável 1.4462  $t \leq 6$ , (a) flat e (b) corner.

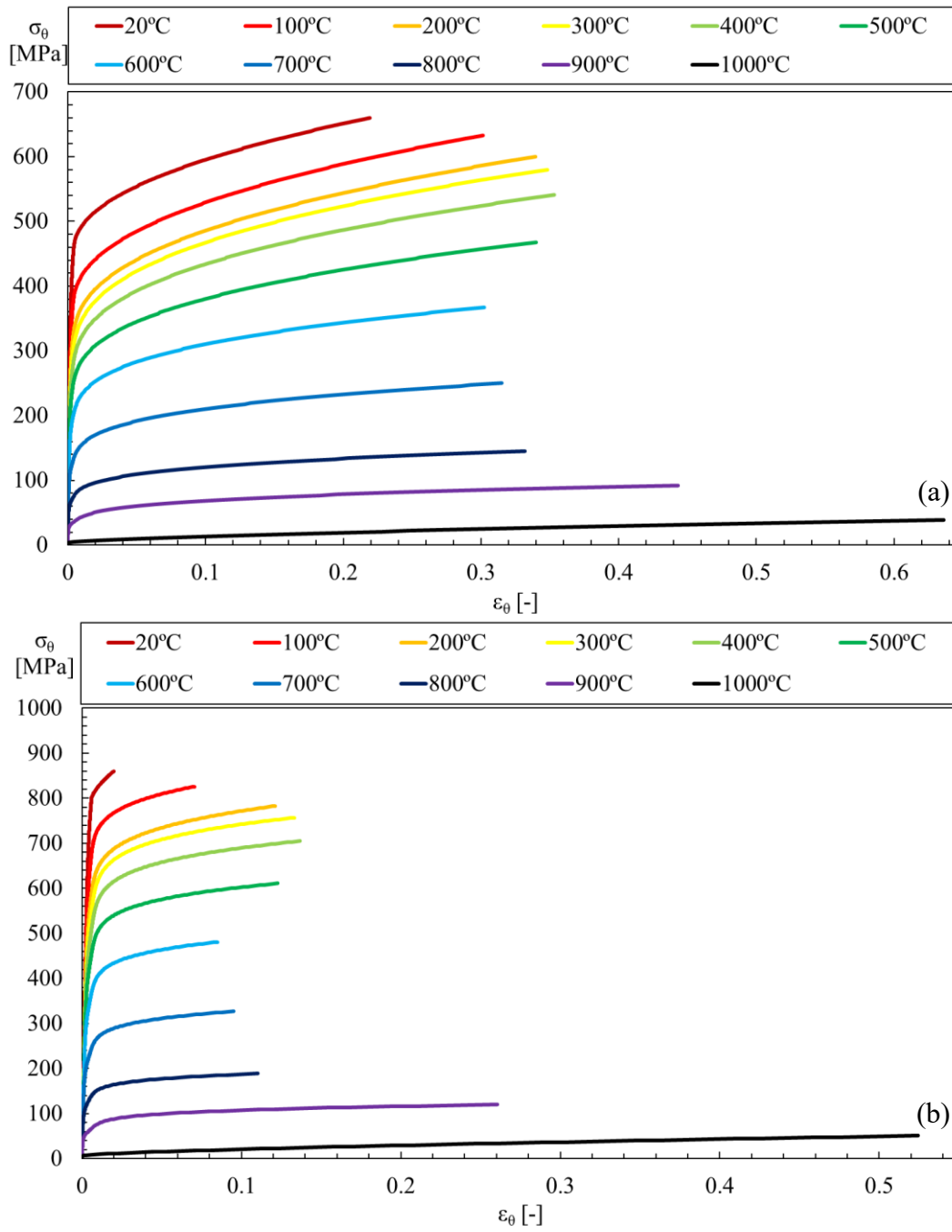


Figura A.9 - Gráficos do aço inoxidável 1.4462  $t \leq 12$ , (a) flat e (b) corner.

## ANEXO B

Nesta sessão, são apresentadas as imagens das simulações numéricas da base de dados e base paramétrica.

### B.1. Resultados Estáticos.

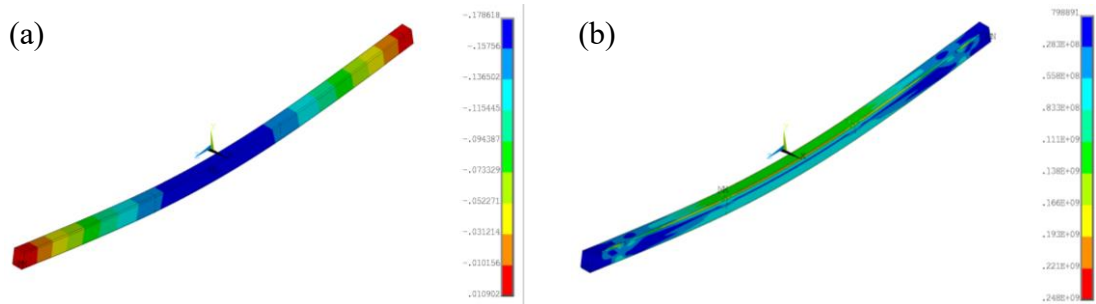


Figura B.1 – Amostra RHS 140x100x5 material S30408 (a) deslocamento máximo no eixo x e (b) tensões de von Mises.

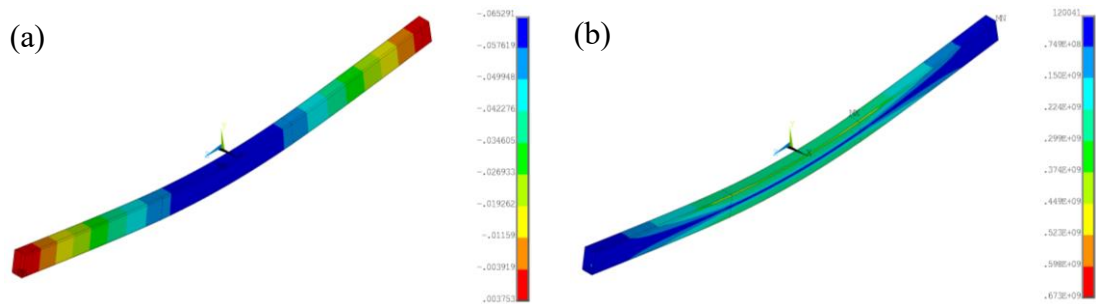


Figura B.2 – Amostra RHS 180x100x5 material S30408 (a) deslocamento máximo no eixo x e (b) tensões de von Mises.

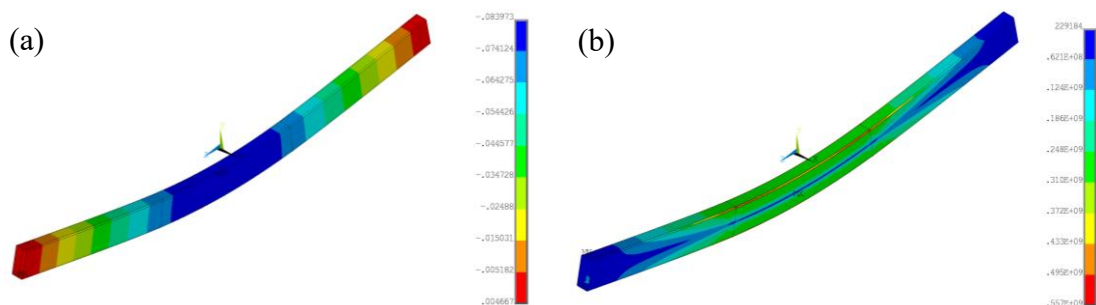
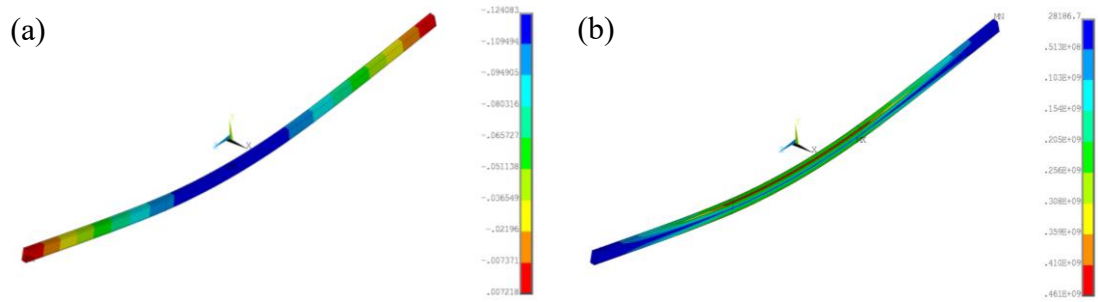
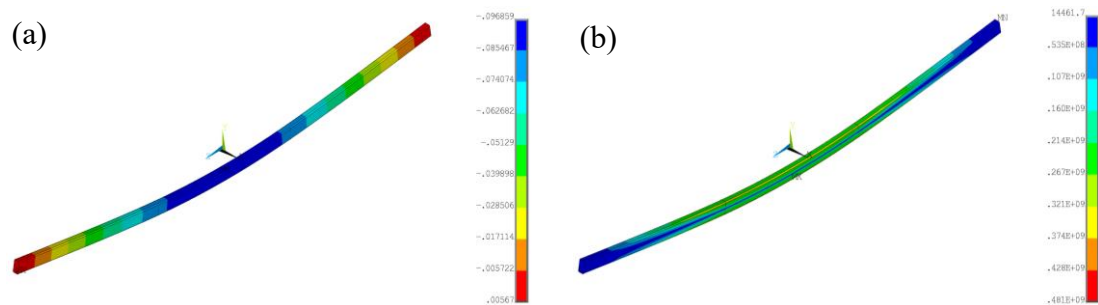


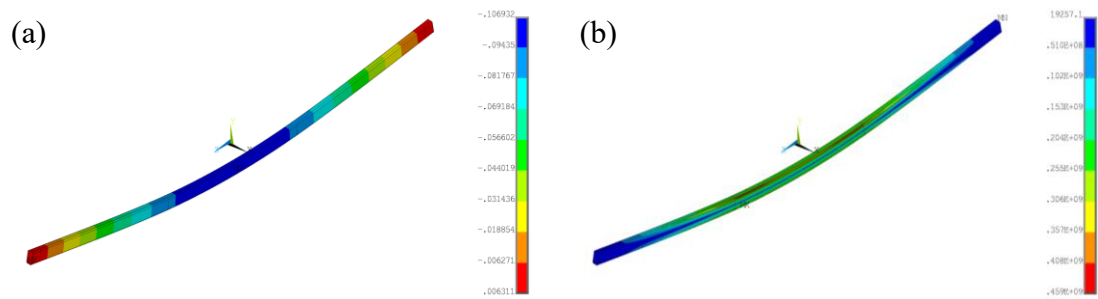
Figura B.3 – Amostra RHS 220x100x5 material S30408 (a) deslocamento máximo no eixo x e (b) tensões de von Mises.



**Figura B.4 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**

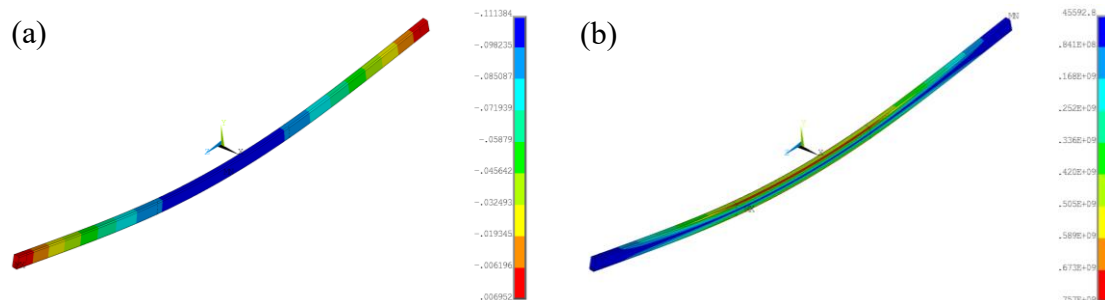


**Figura B.5 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**

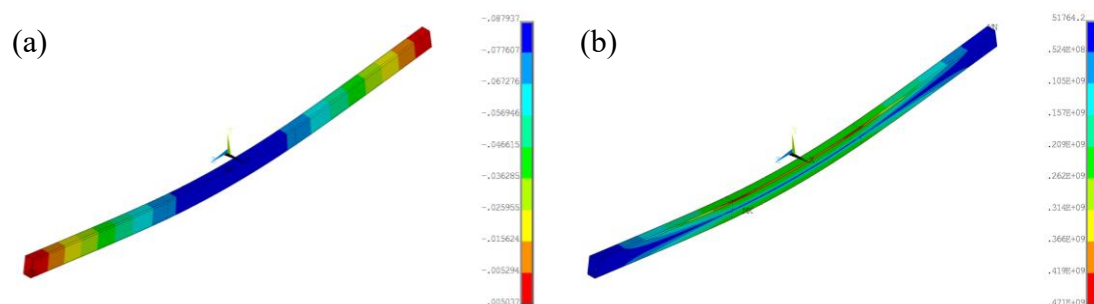


**Figura B.6 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**

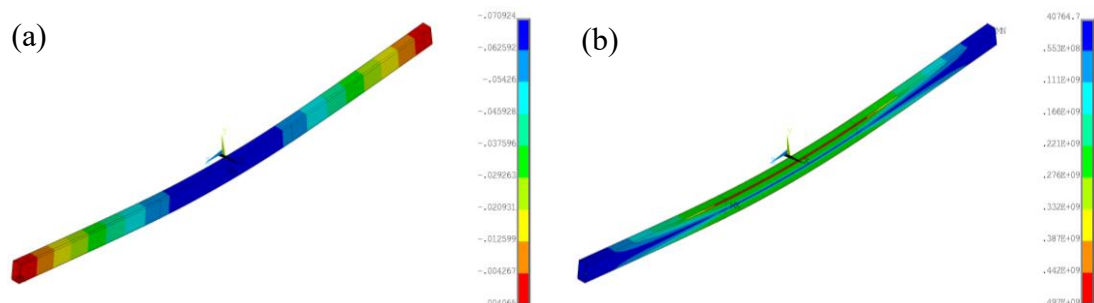
Fonte: Autor.



**Figura B.7 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo e (b) tensões de von Mises.**

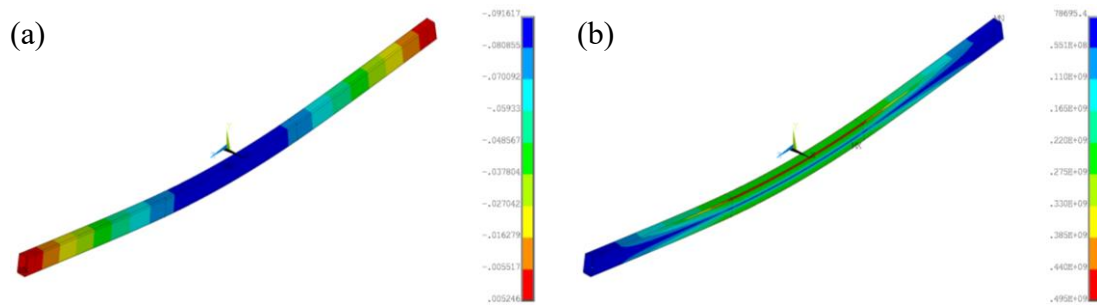


**Figura B.8 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo e (b) tensões de von Mises.**

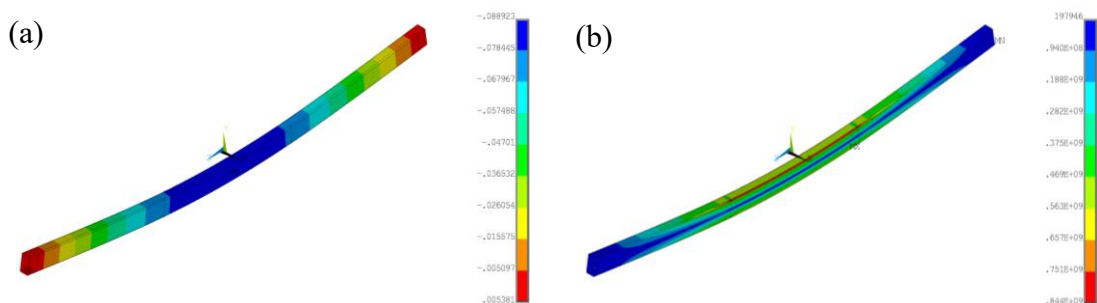


**Figura B.9 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo e (b) tensões de von Mises.**

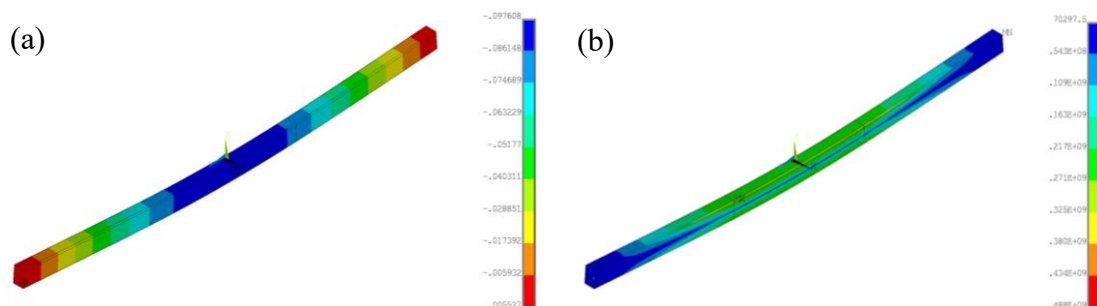
Fonte: Autor.



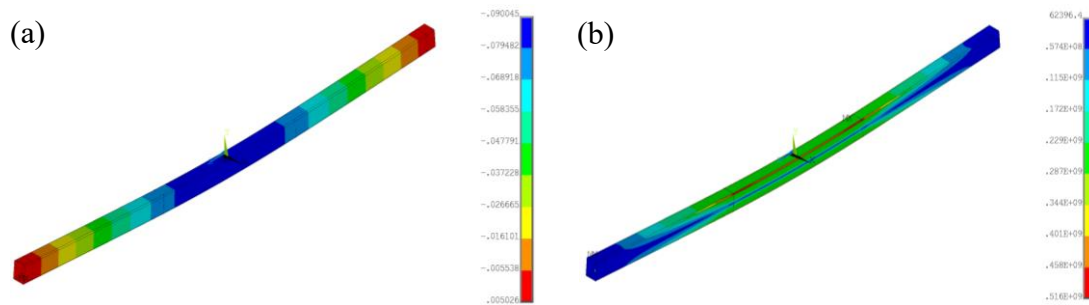
**Figura B.10 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



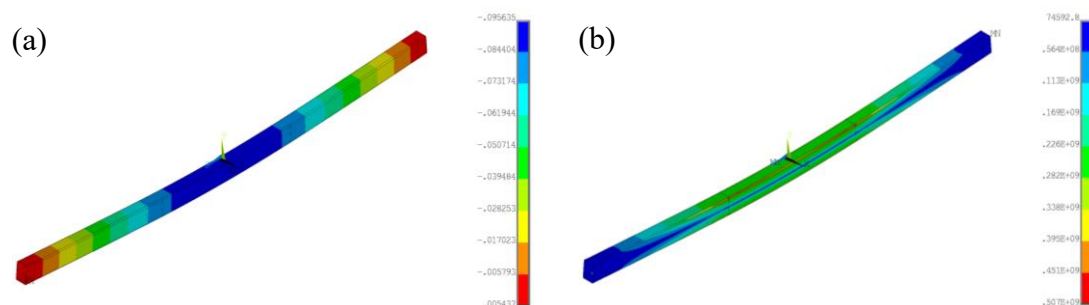
**Figura B.11 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



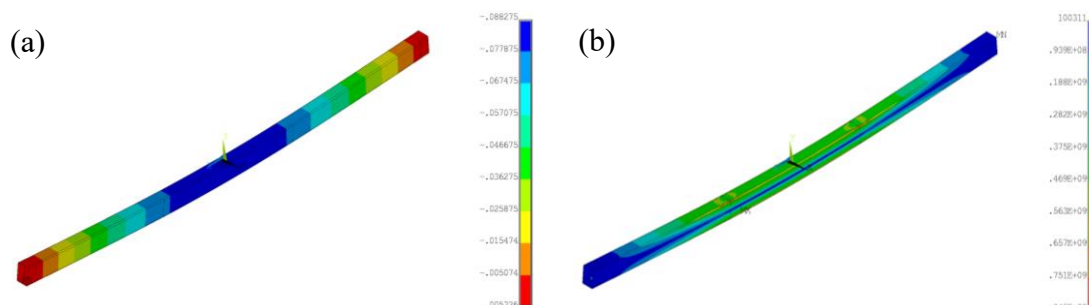
**Figura B.12 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



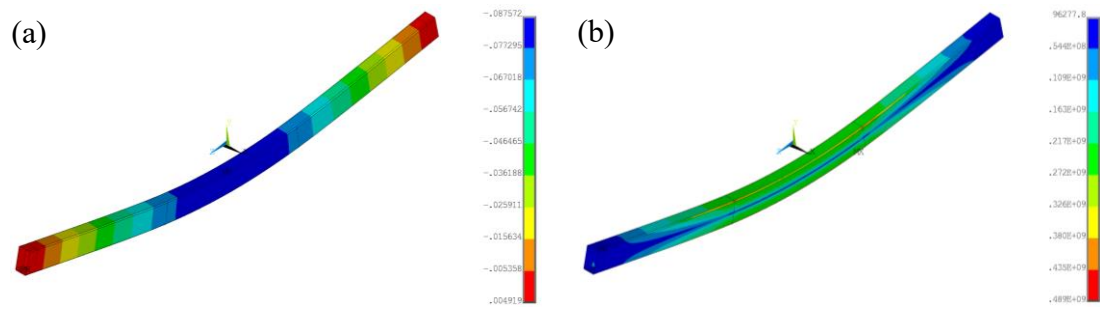
**Figura B.13 – Amostra RHSS 150x100x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



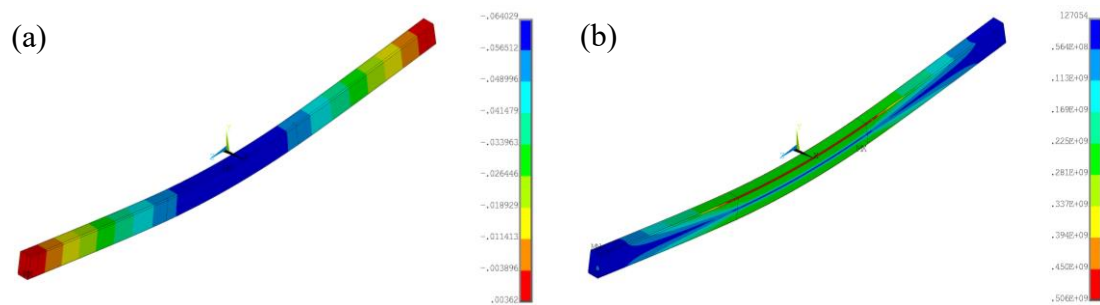
**Figura B.14 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



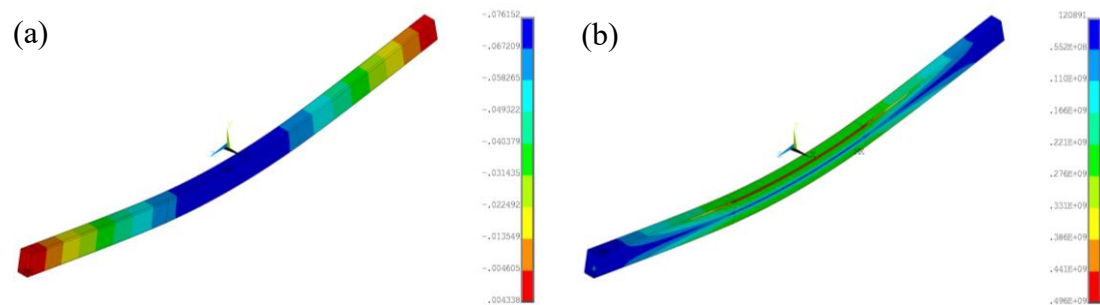
**Figura B.15 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



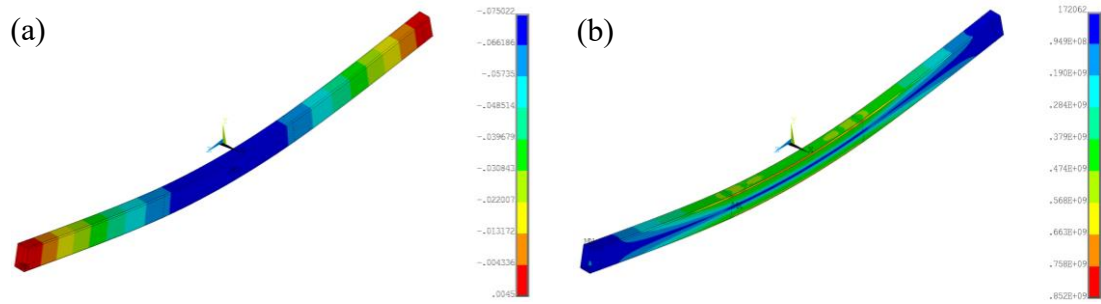
**Figura B.16 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



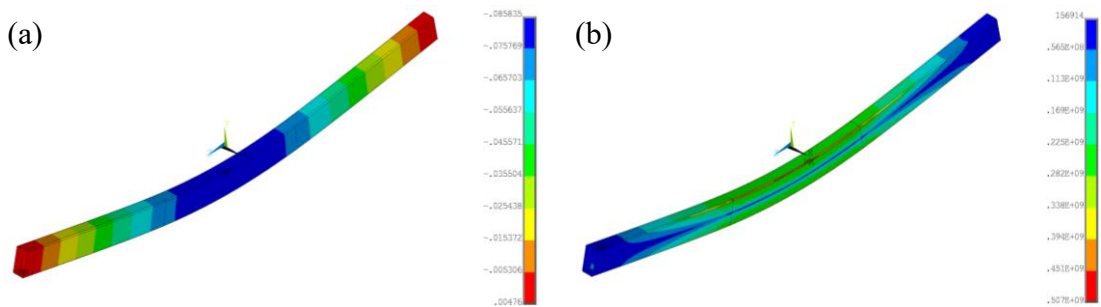
**Figura B.17 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



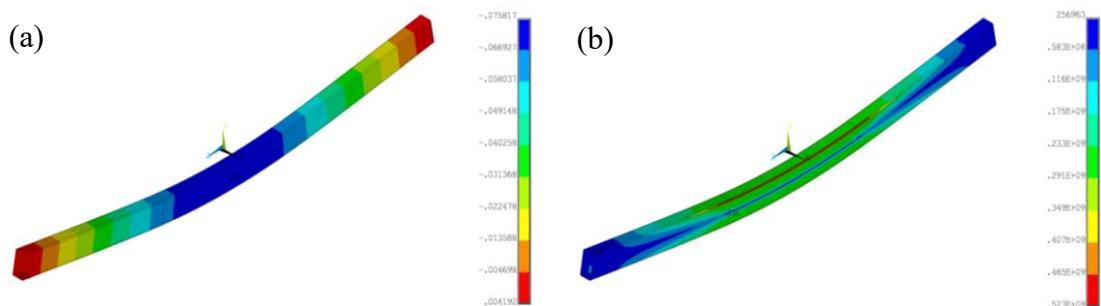
**Figura B.18 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



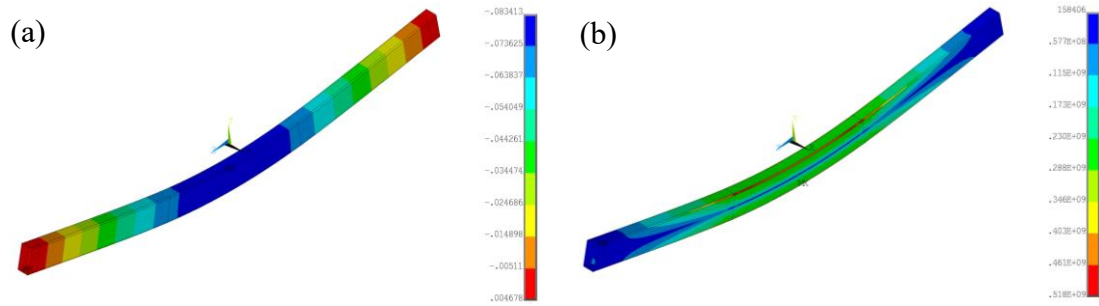
**Figura B.19 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



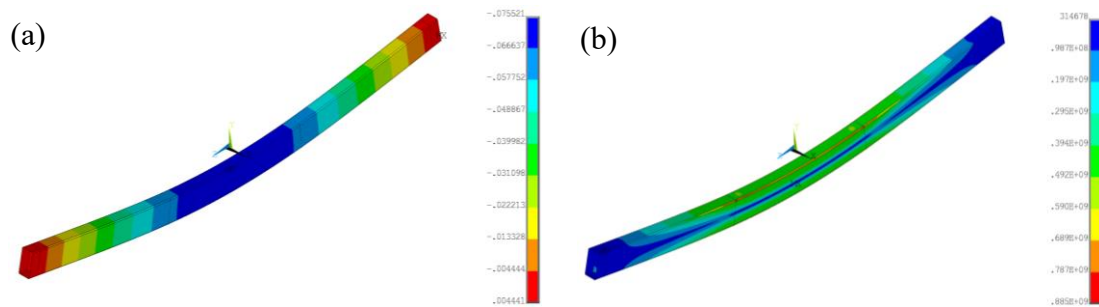
**Figura B.20 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



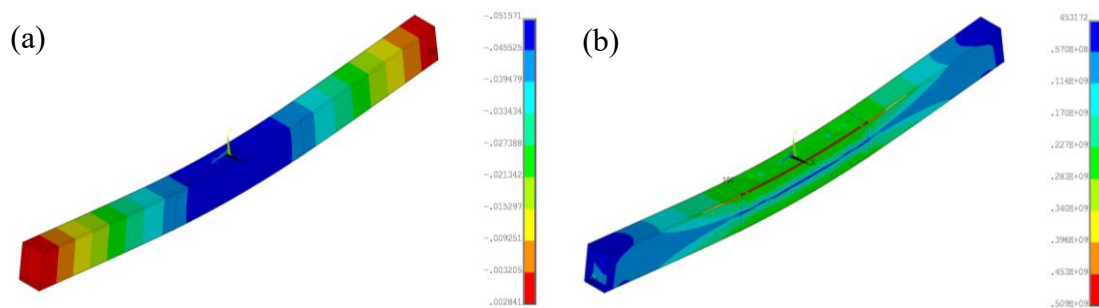
**Figura B.21 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



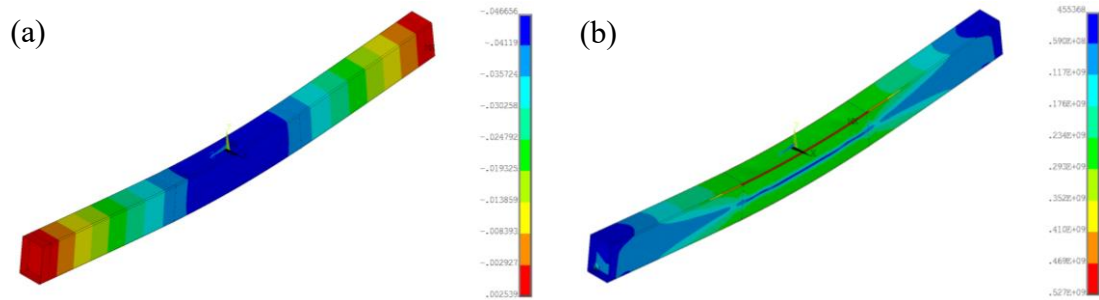
**Figura B.22 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



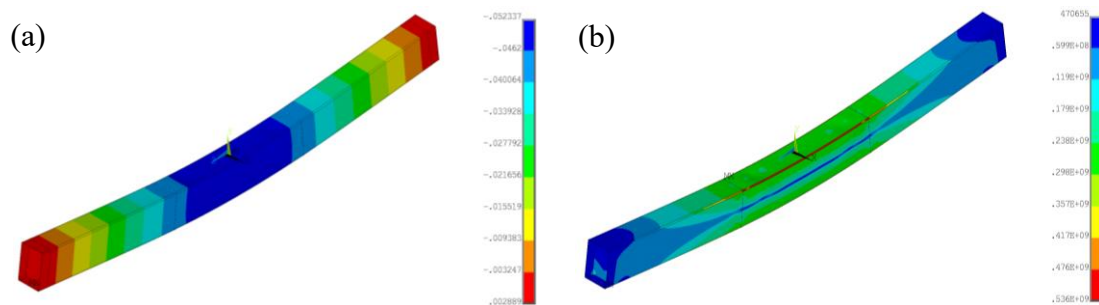
**Figura B.23 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



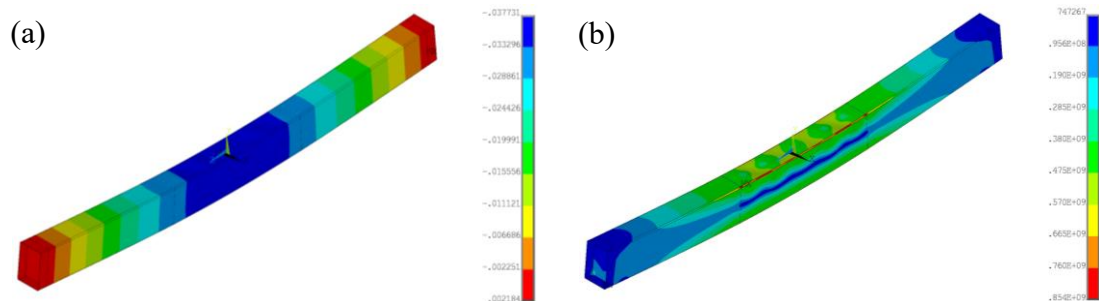
**Figura B.24 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



**Figura B.25 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



**Figura B.26 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**



**Figura B.27 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.**

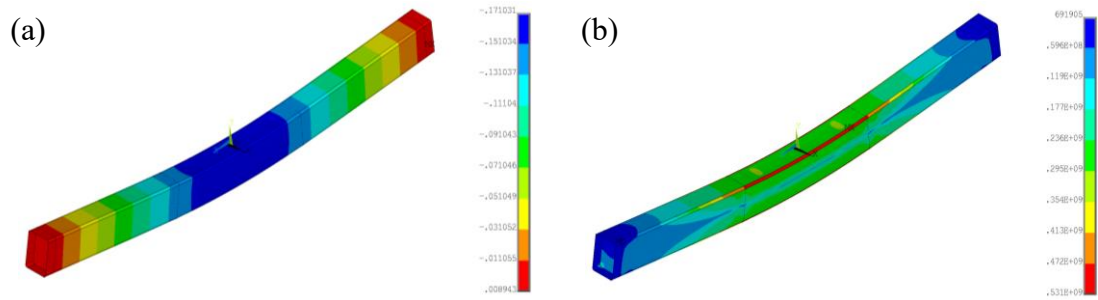


Figura B.28 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4301 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.

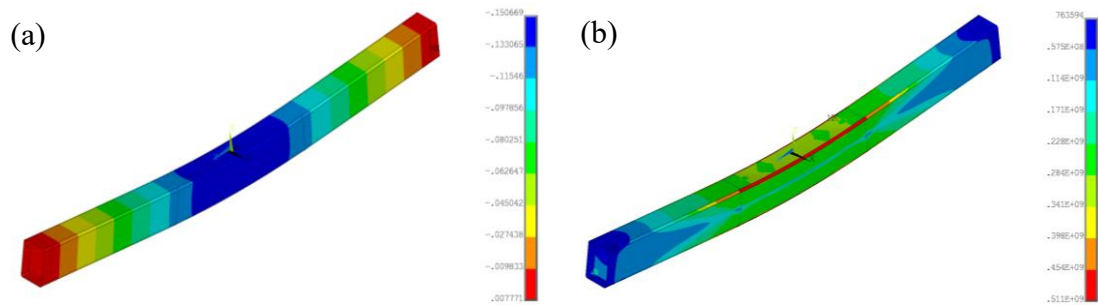


Figura B.29 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4016 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.

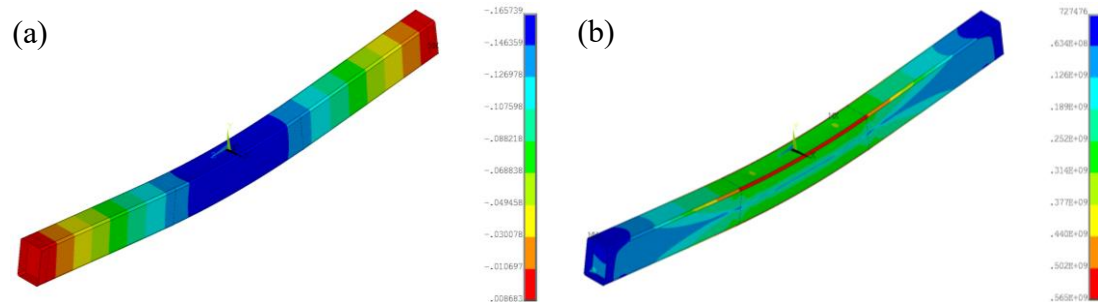


Figura B.30 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4571 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.

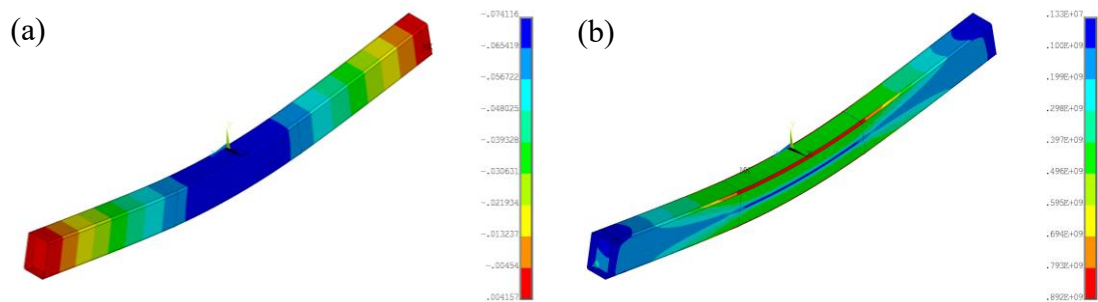


Figura B.31 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4462 (a) deslocamento máximo no eixo y e (b) tensões de von Mises.

## B.2. Resultados Térmicos

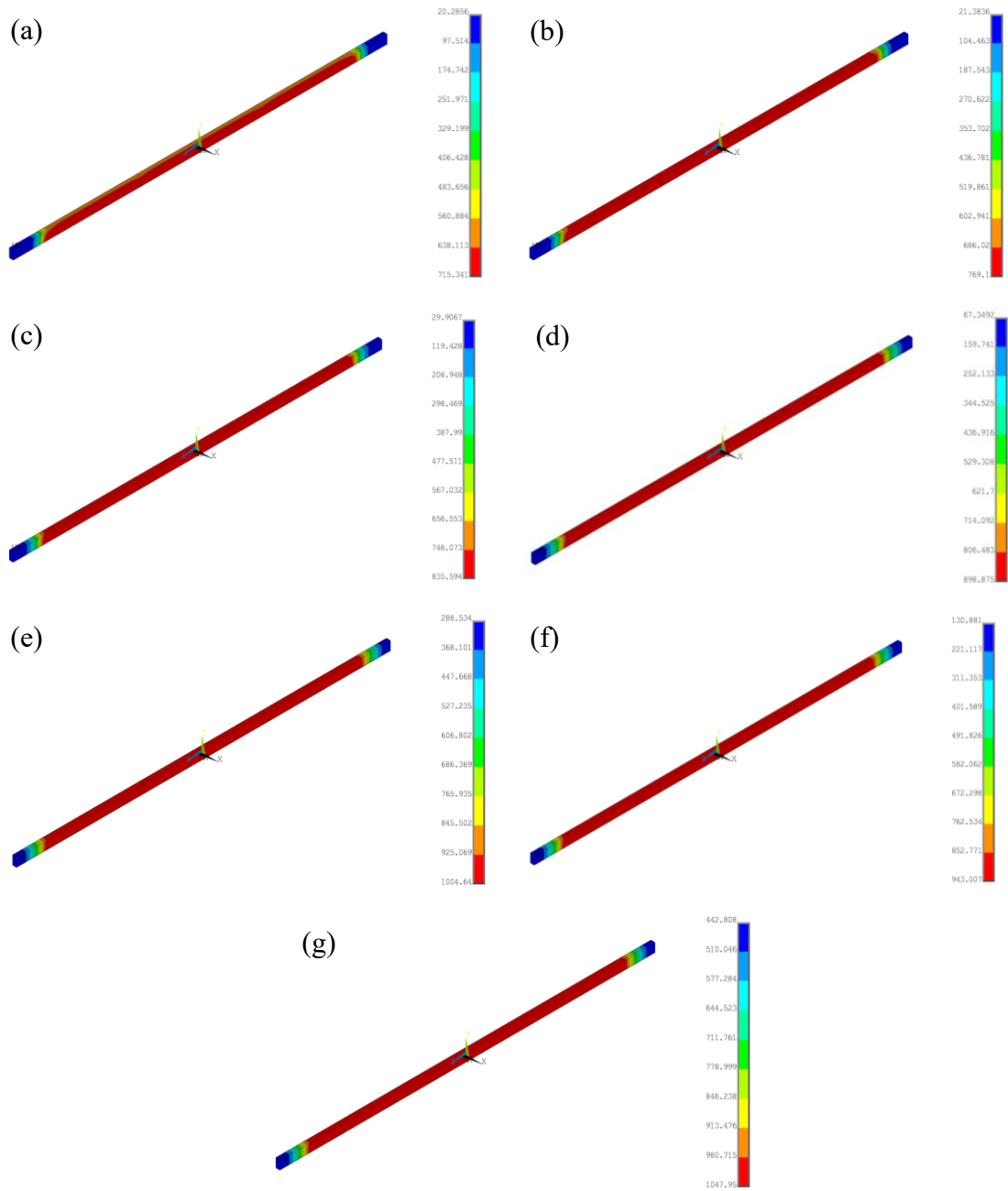
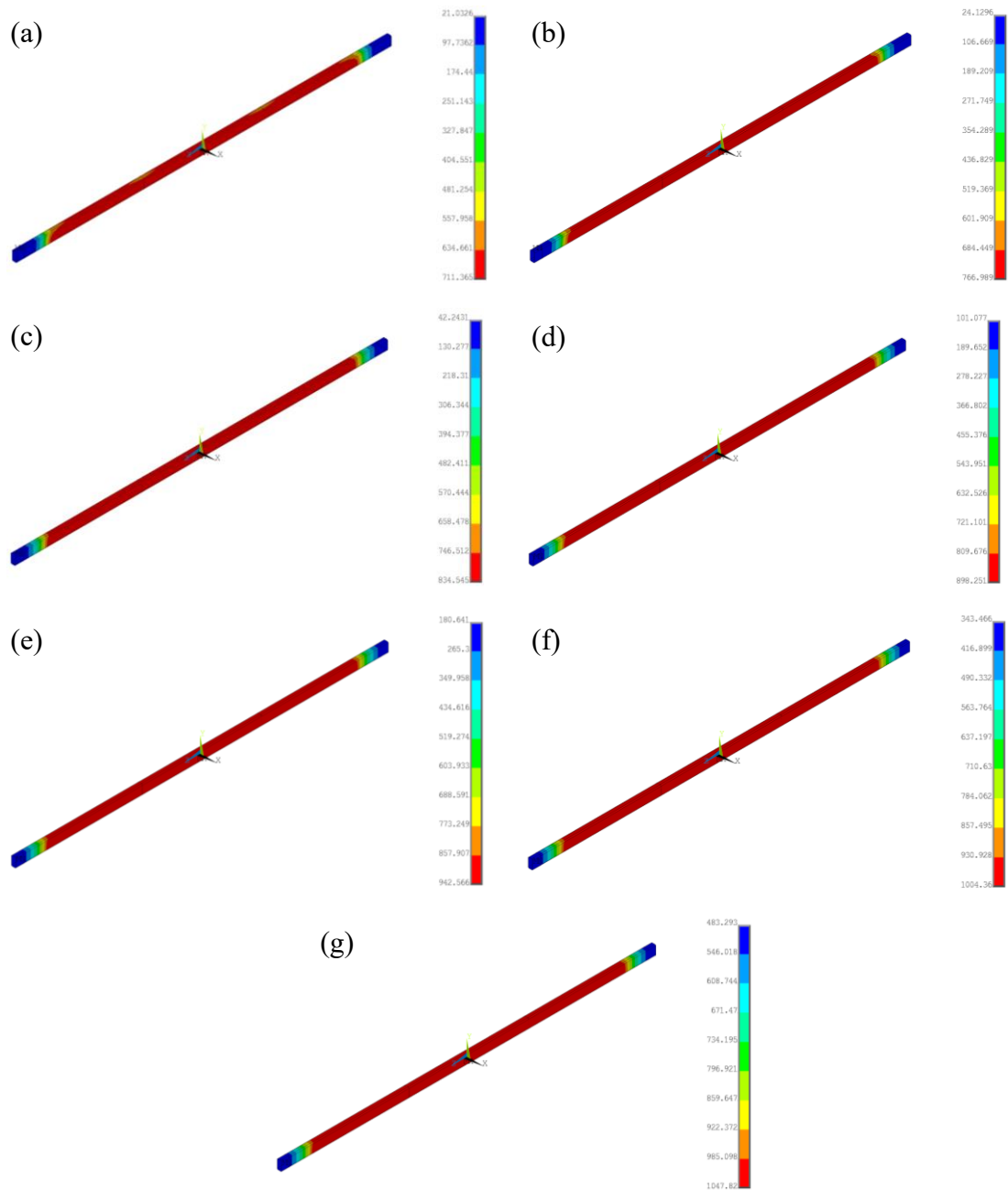
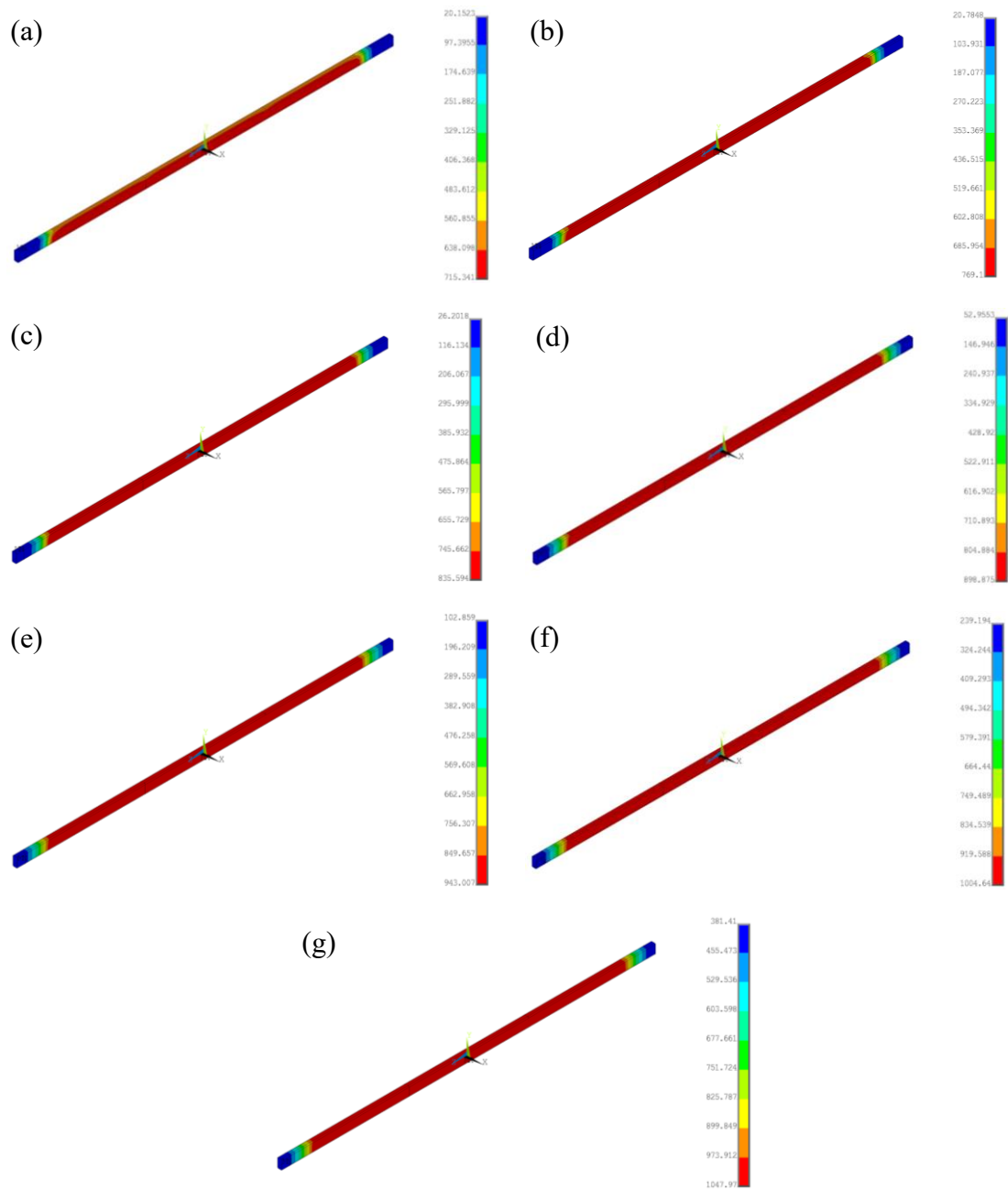


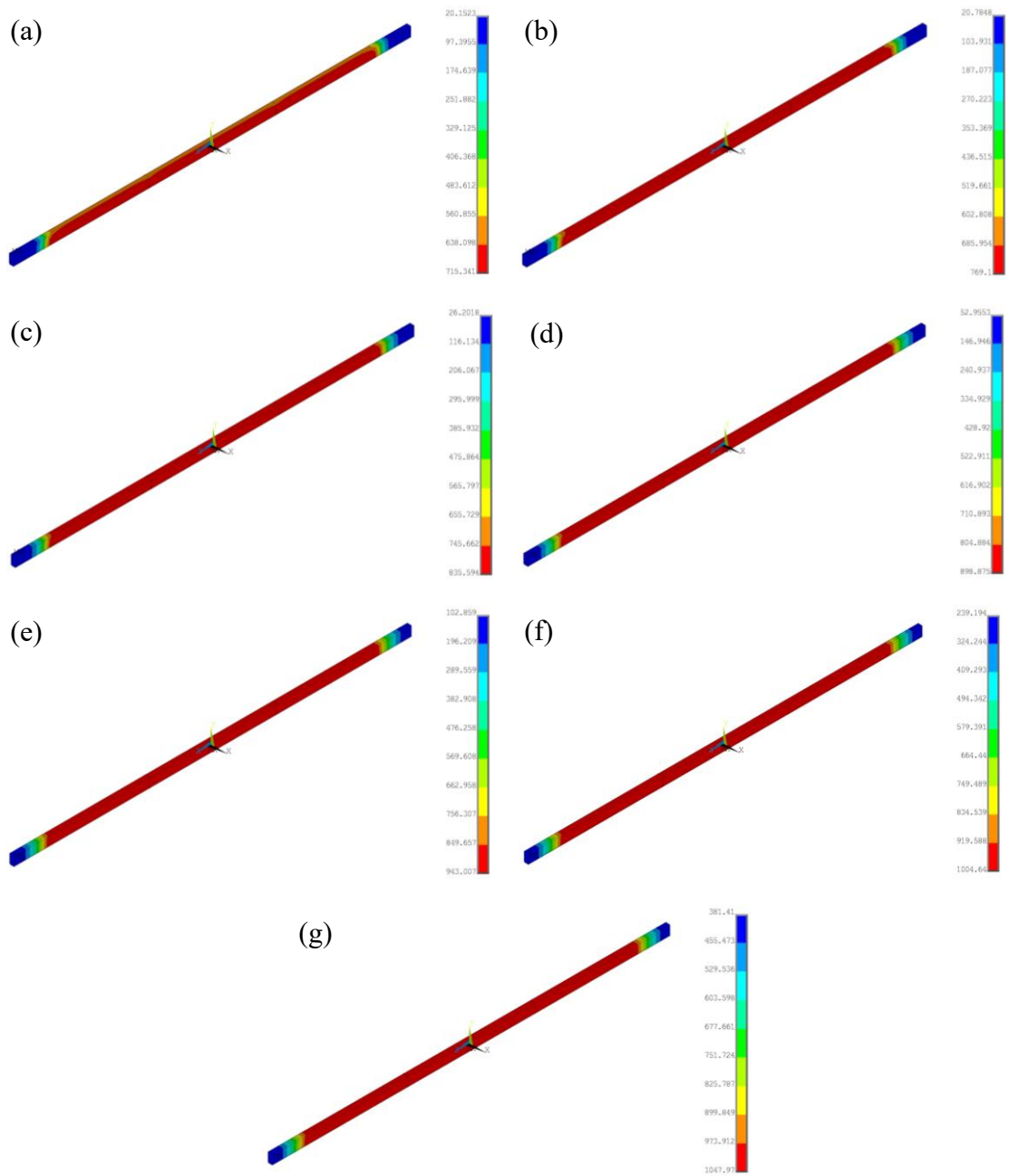
Figura B.32 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.



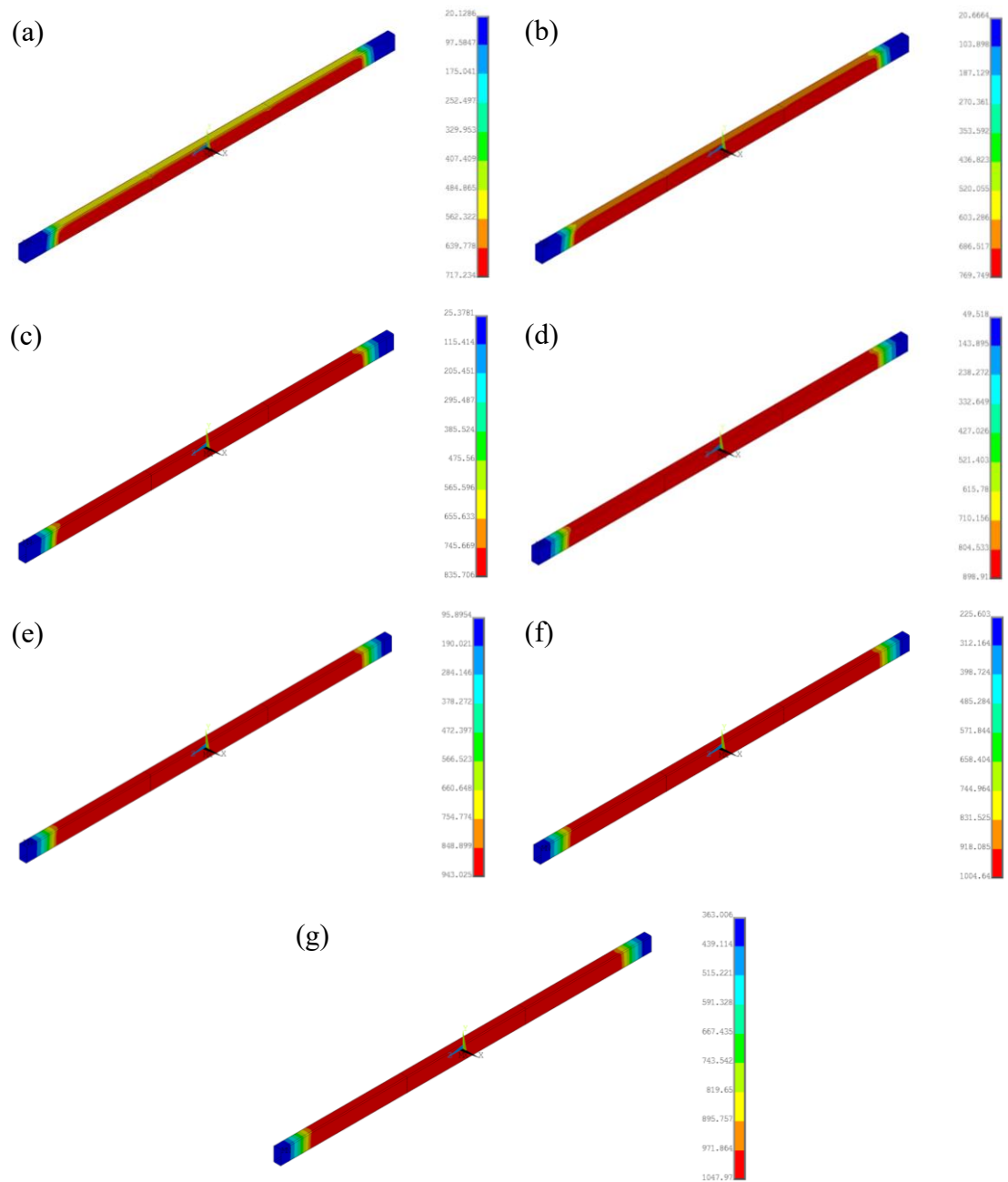
**Figura B.33 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



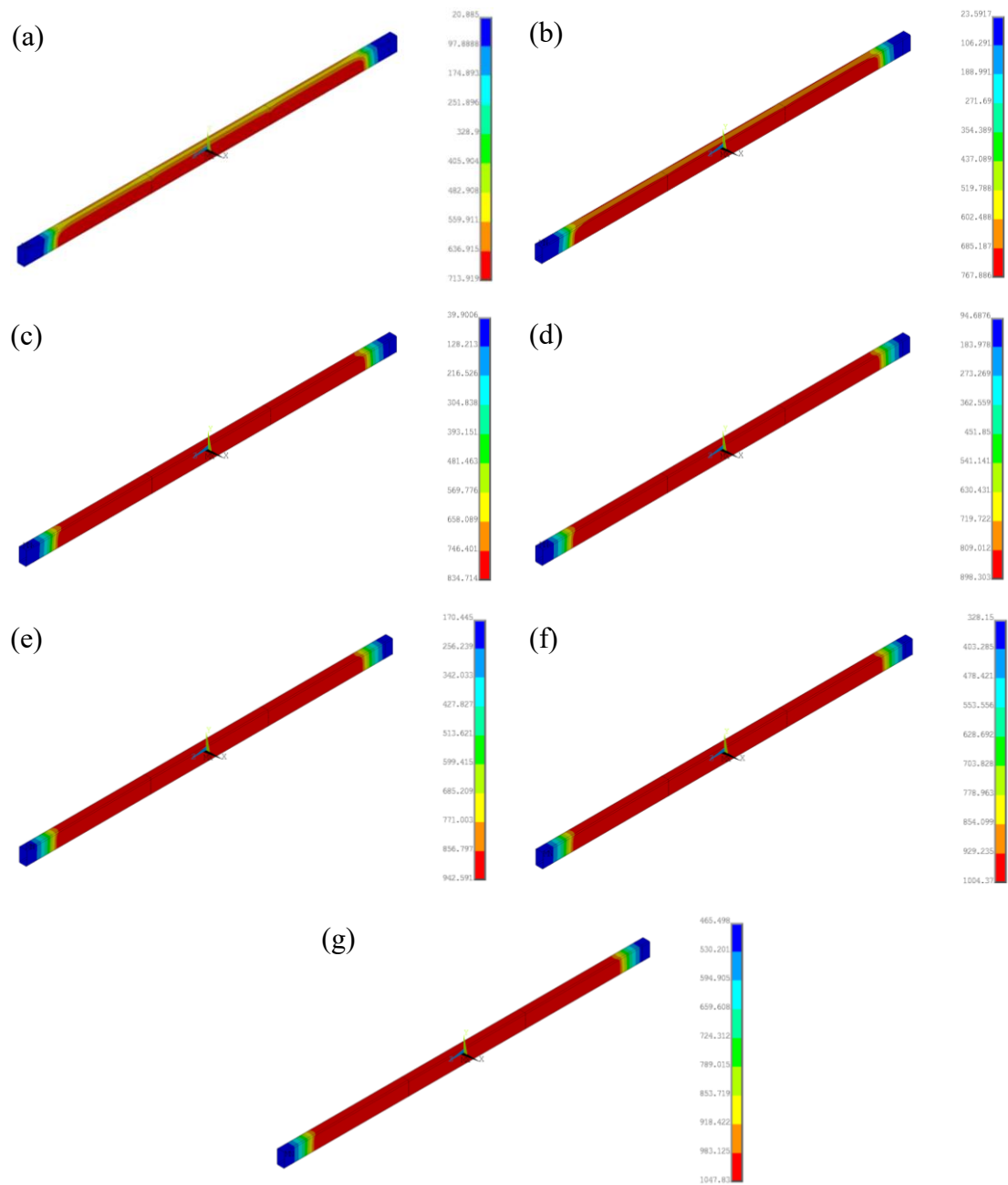
**Figura B.34 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



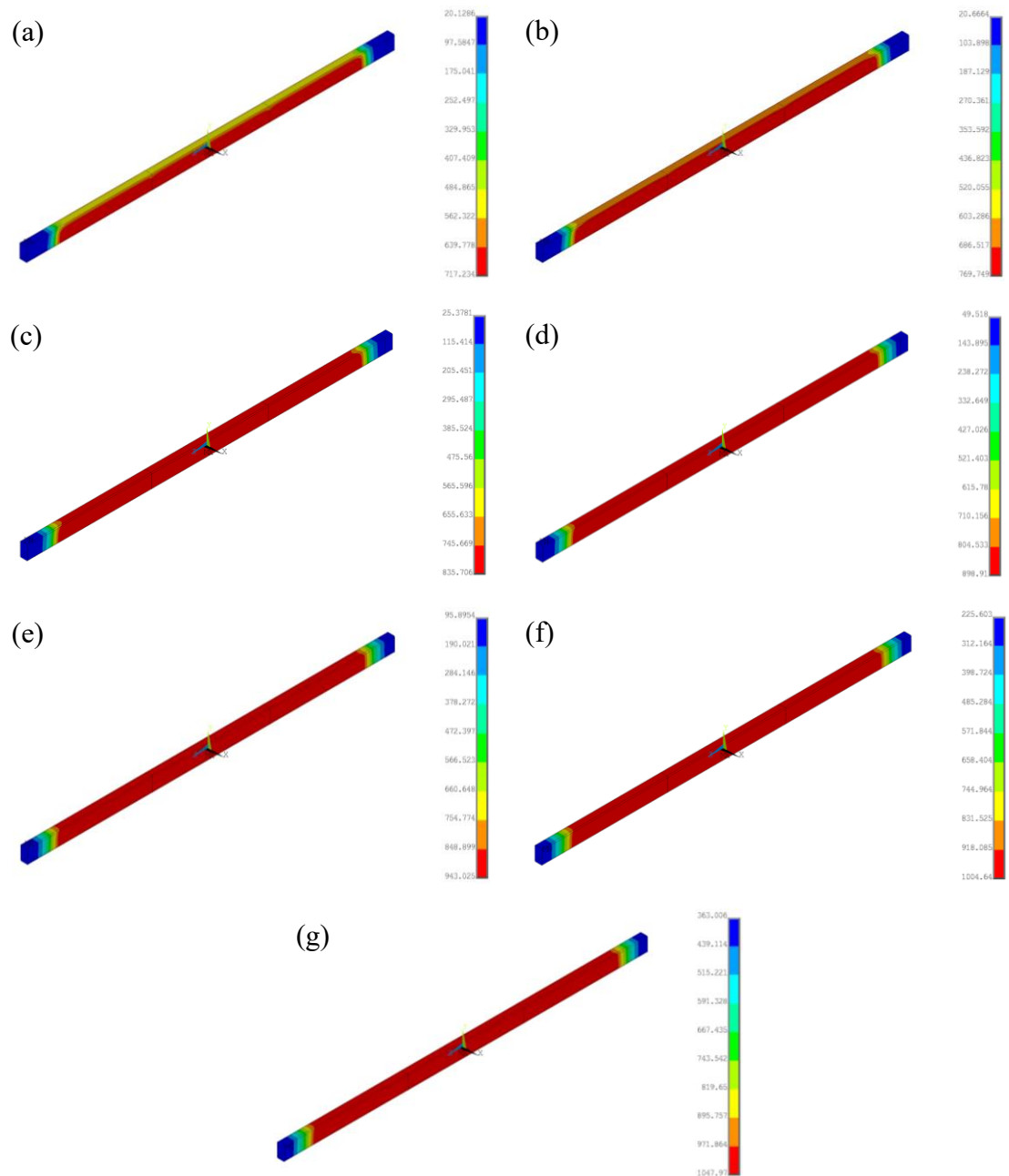
**Figura B.35 – Amostra RHS 100x50x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



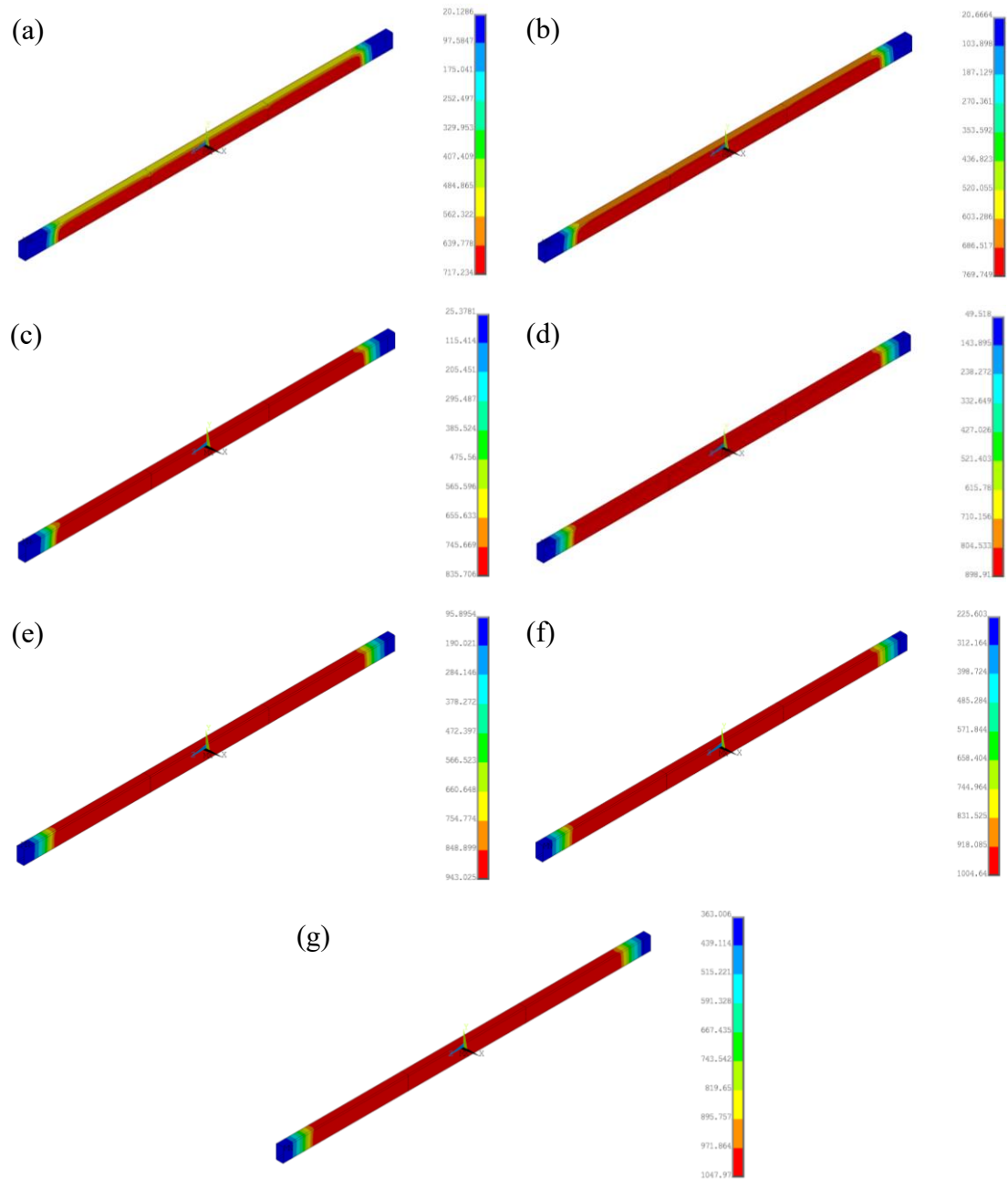
**Figura B.36 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



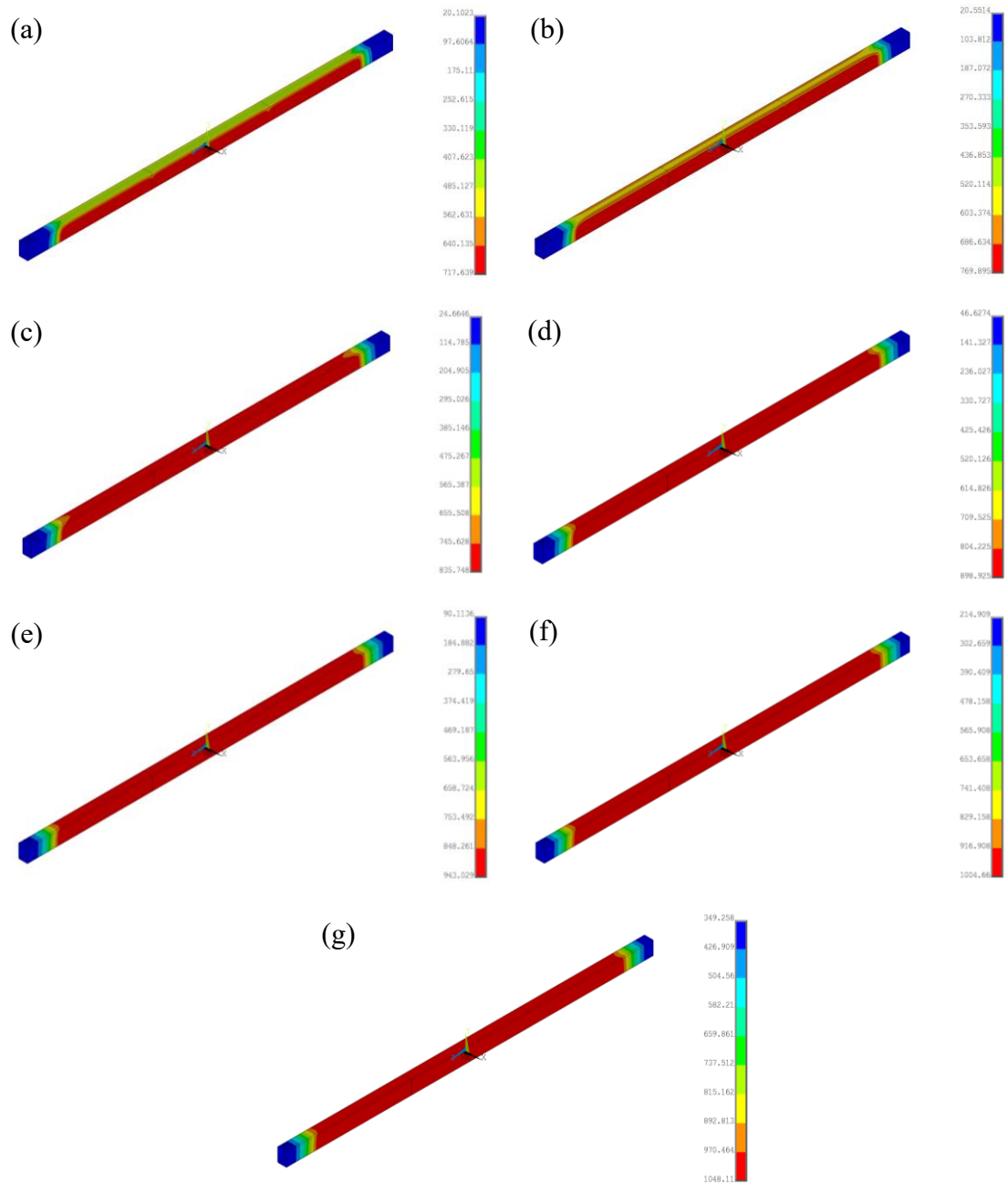
**Figura B.37 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



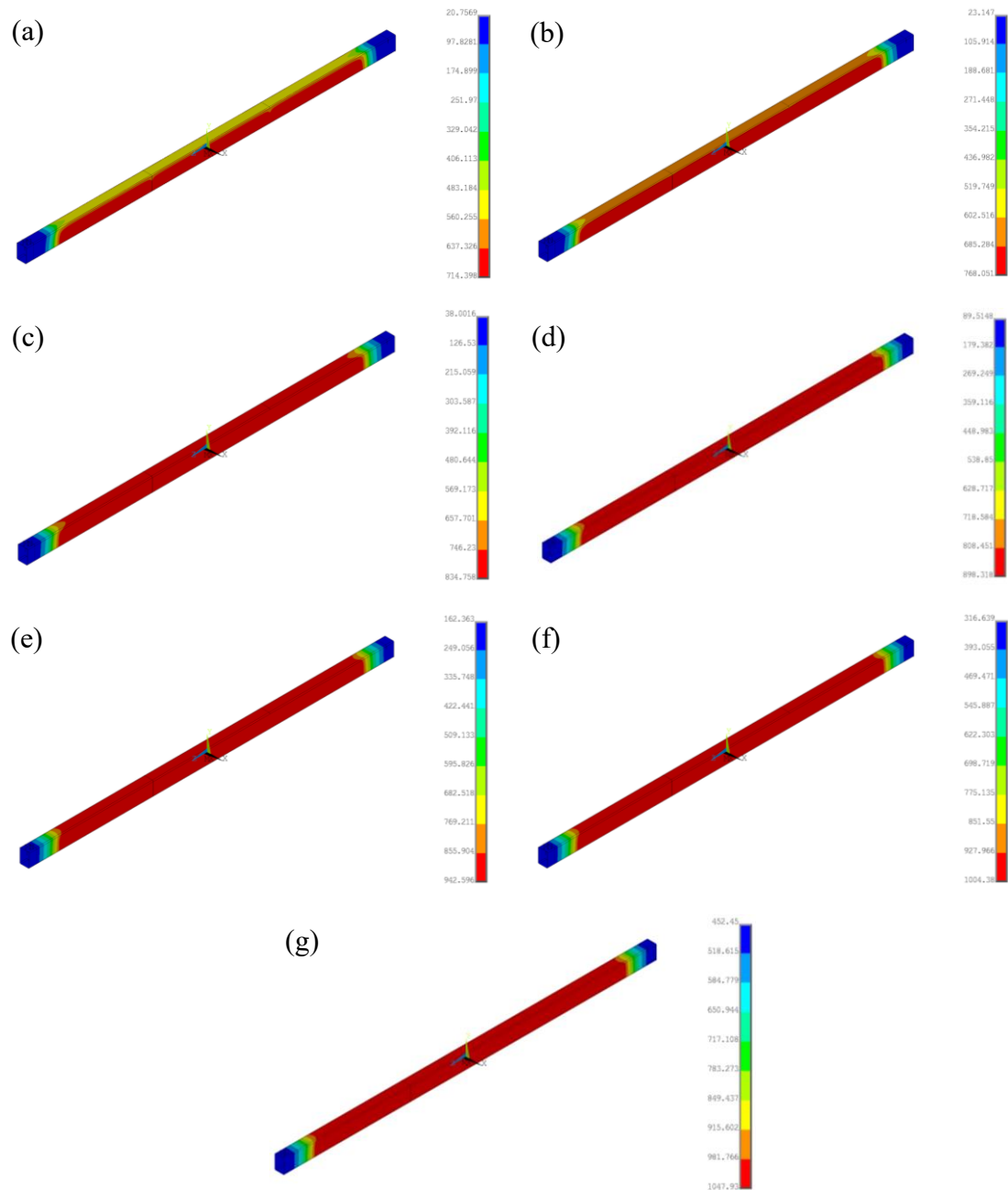
**Figura B.38 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



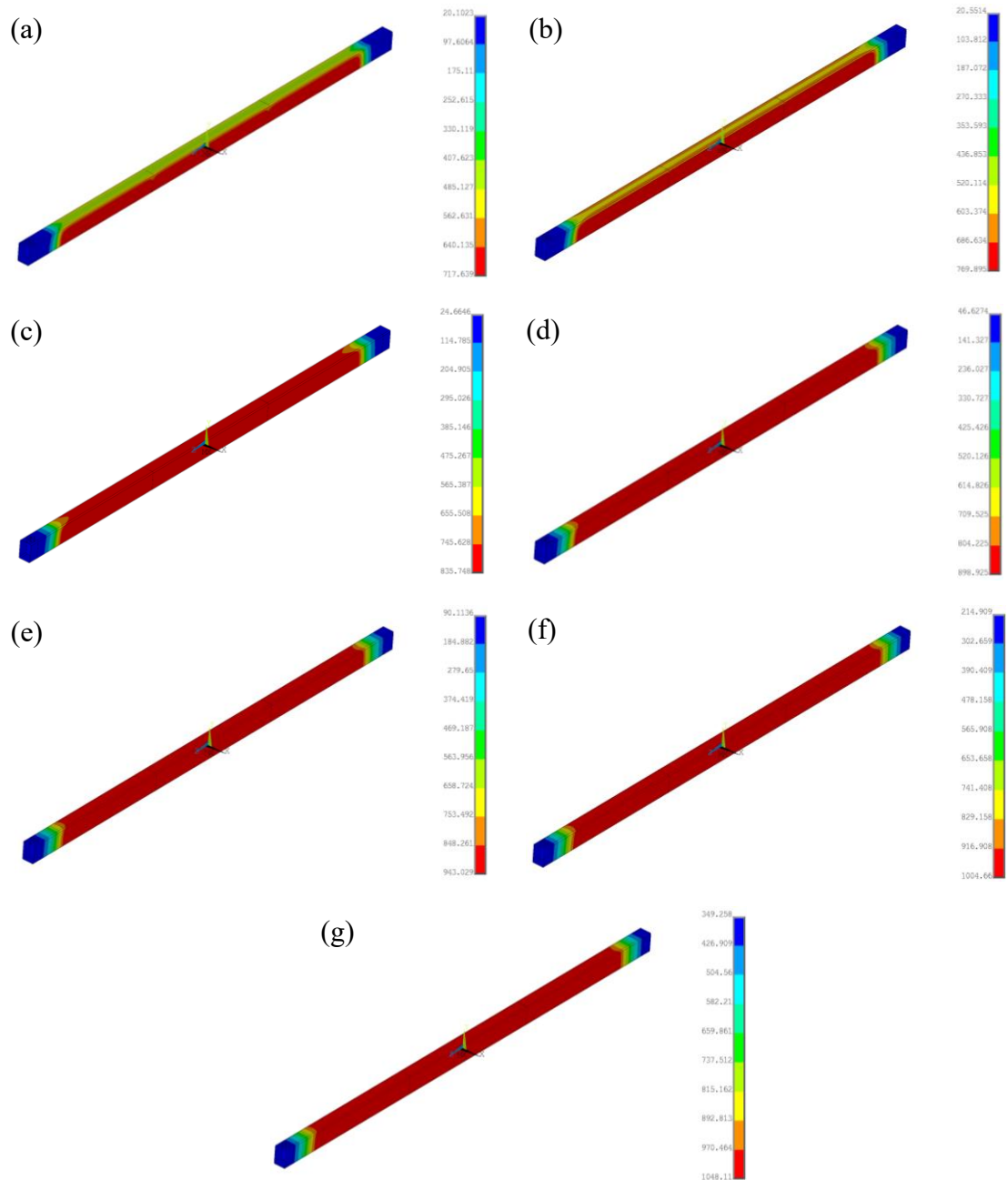
**Figura B.39 – Amostra RHS 150x80x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



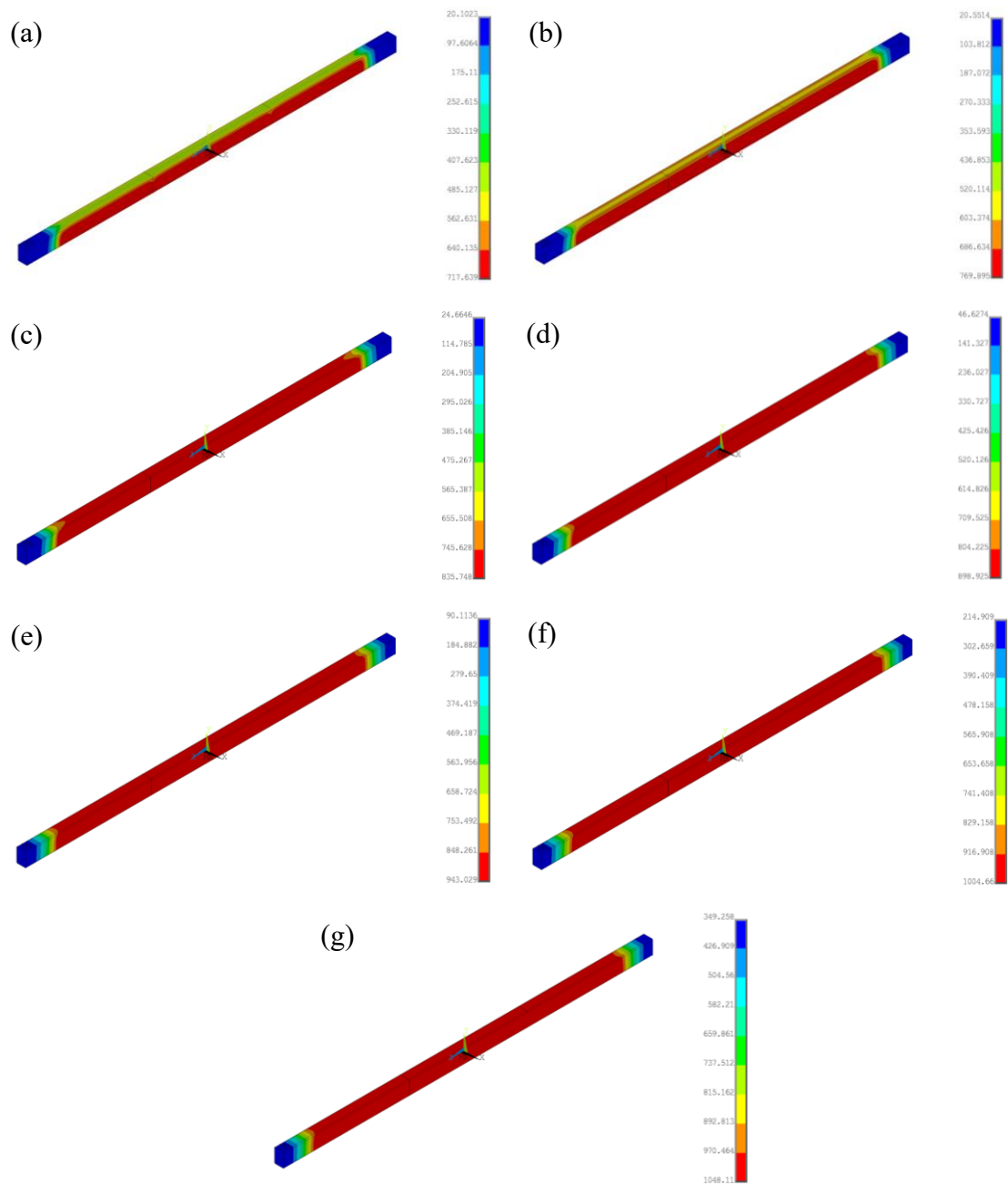
**Figura B.40 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



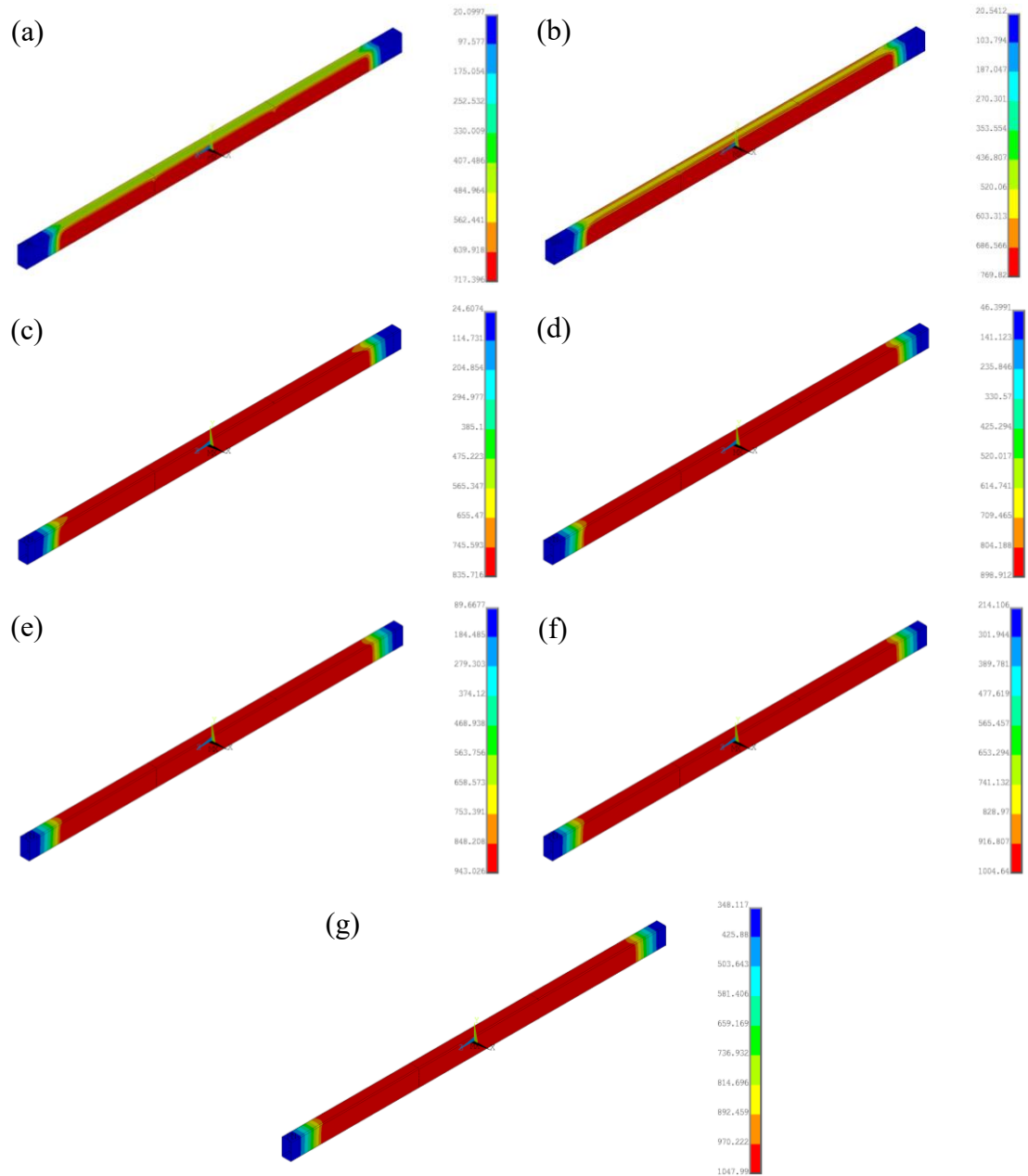
**Figura B.41 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



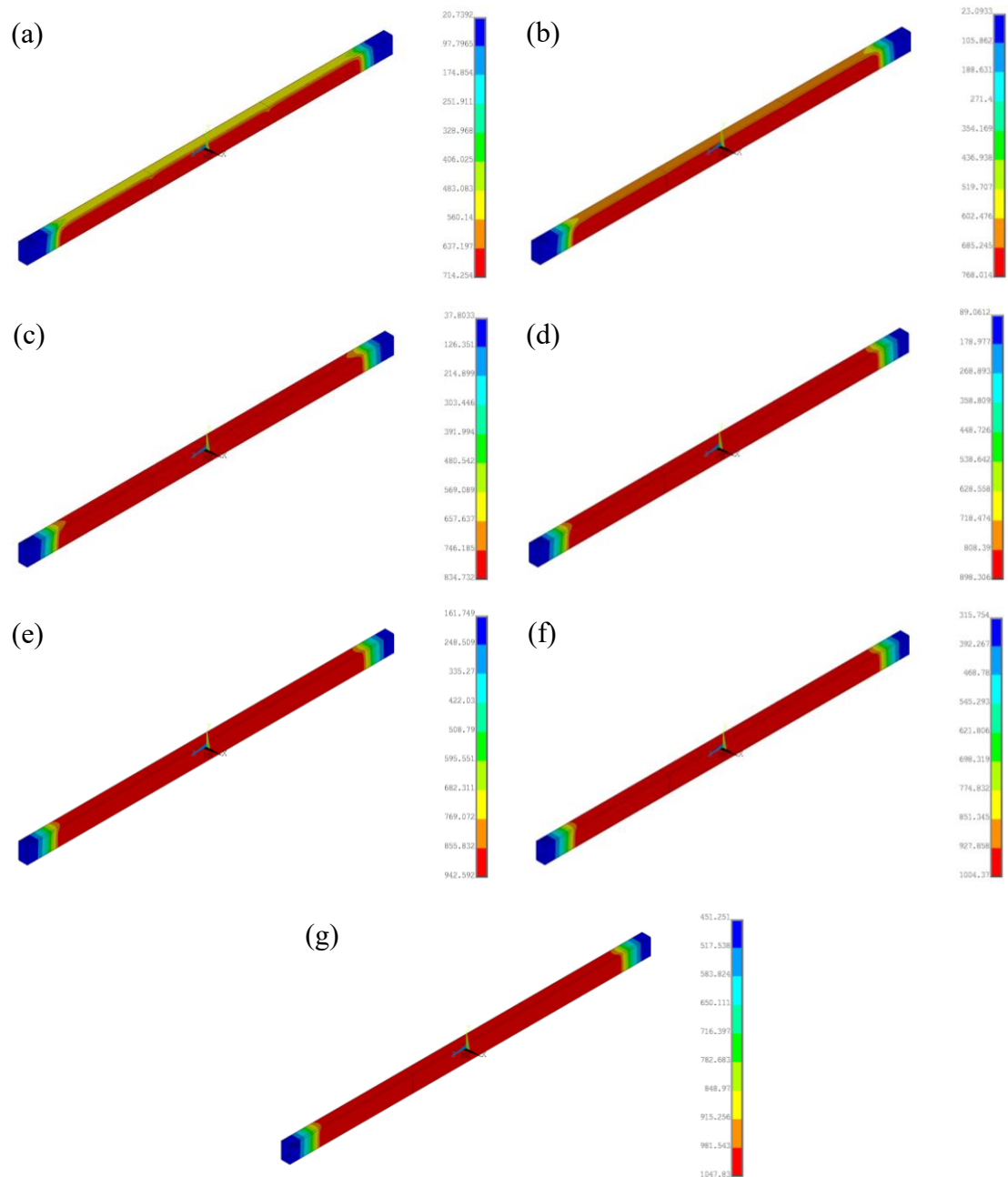
**Figura B.42 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



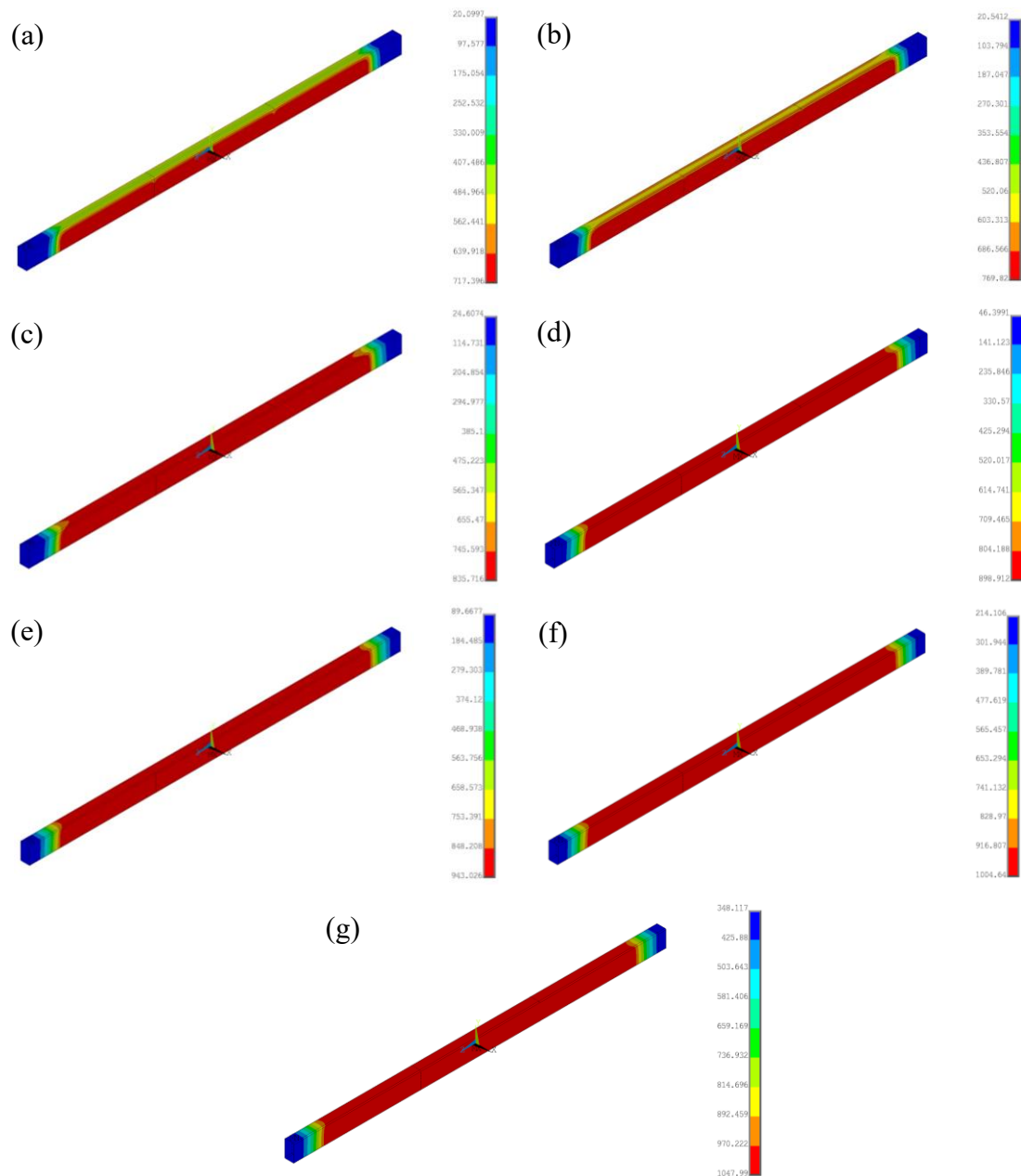
**Figura B.43 – Amostra RHS 150x100x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



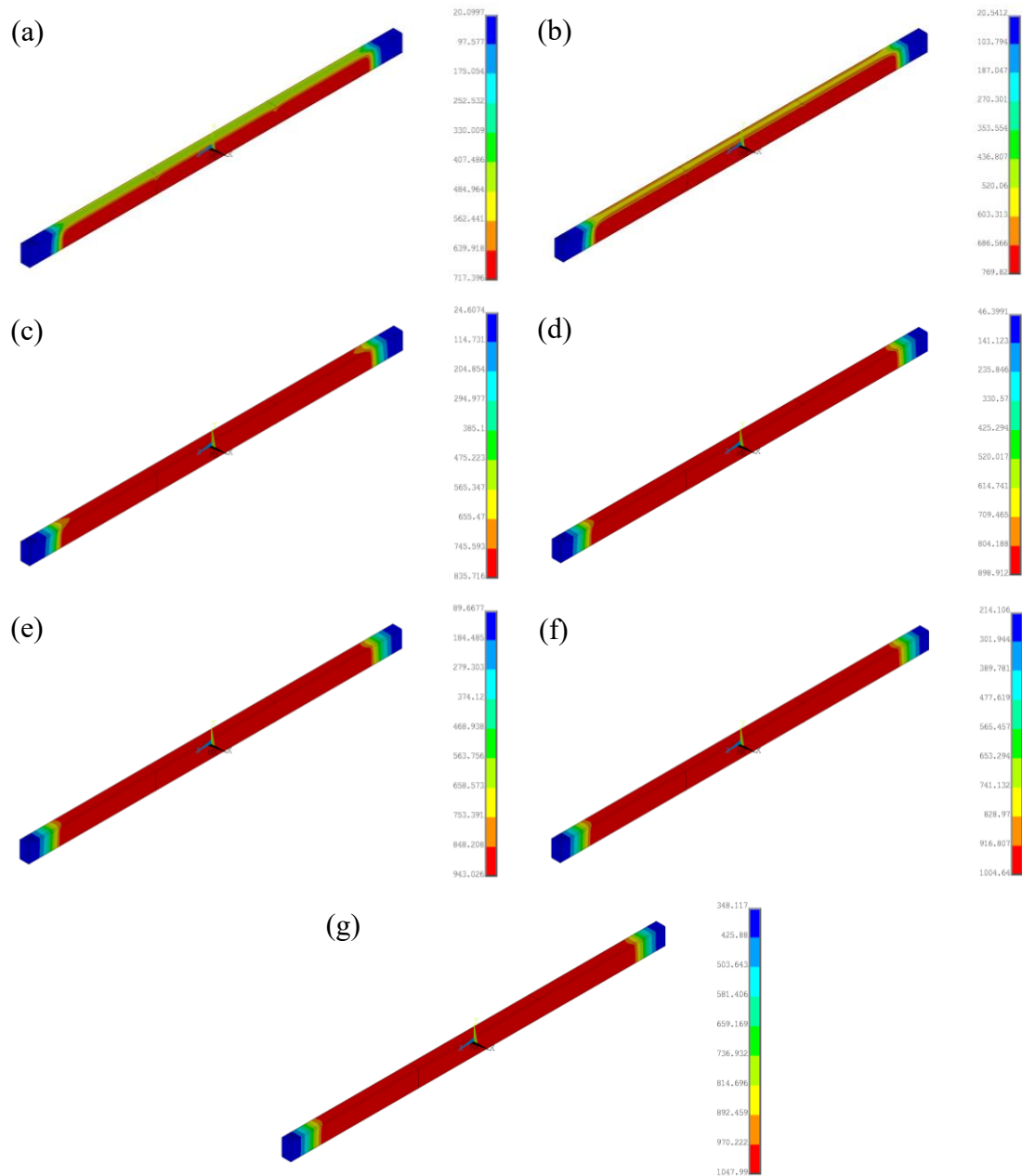
**Figura B.44 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



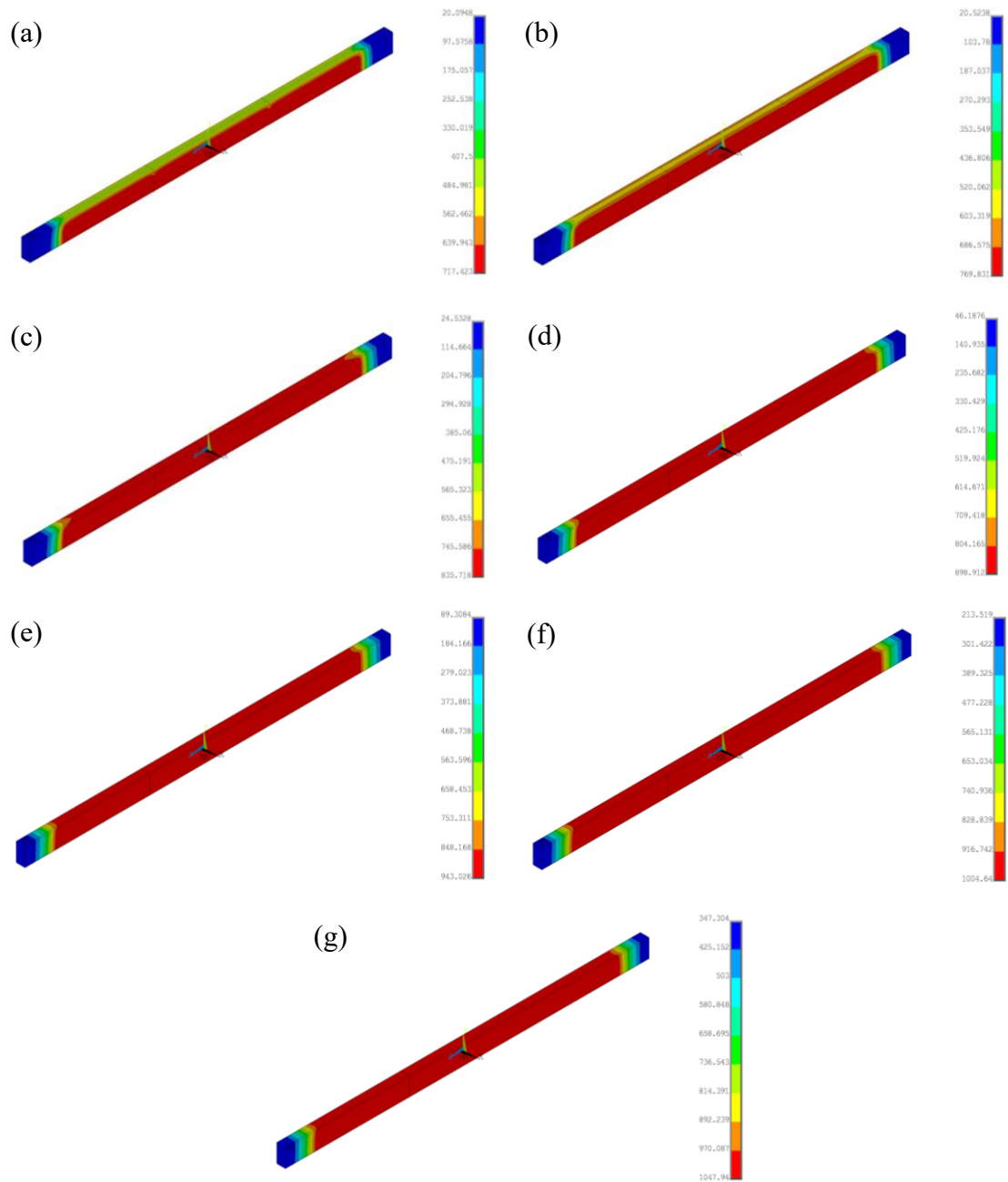
**Figura B.45 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



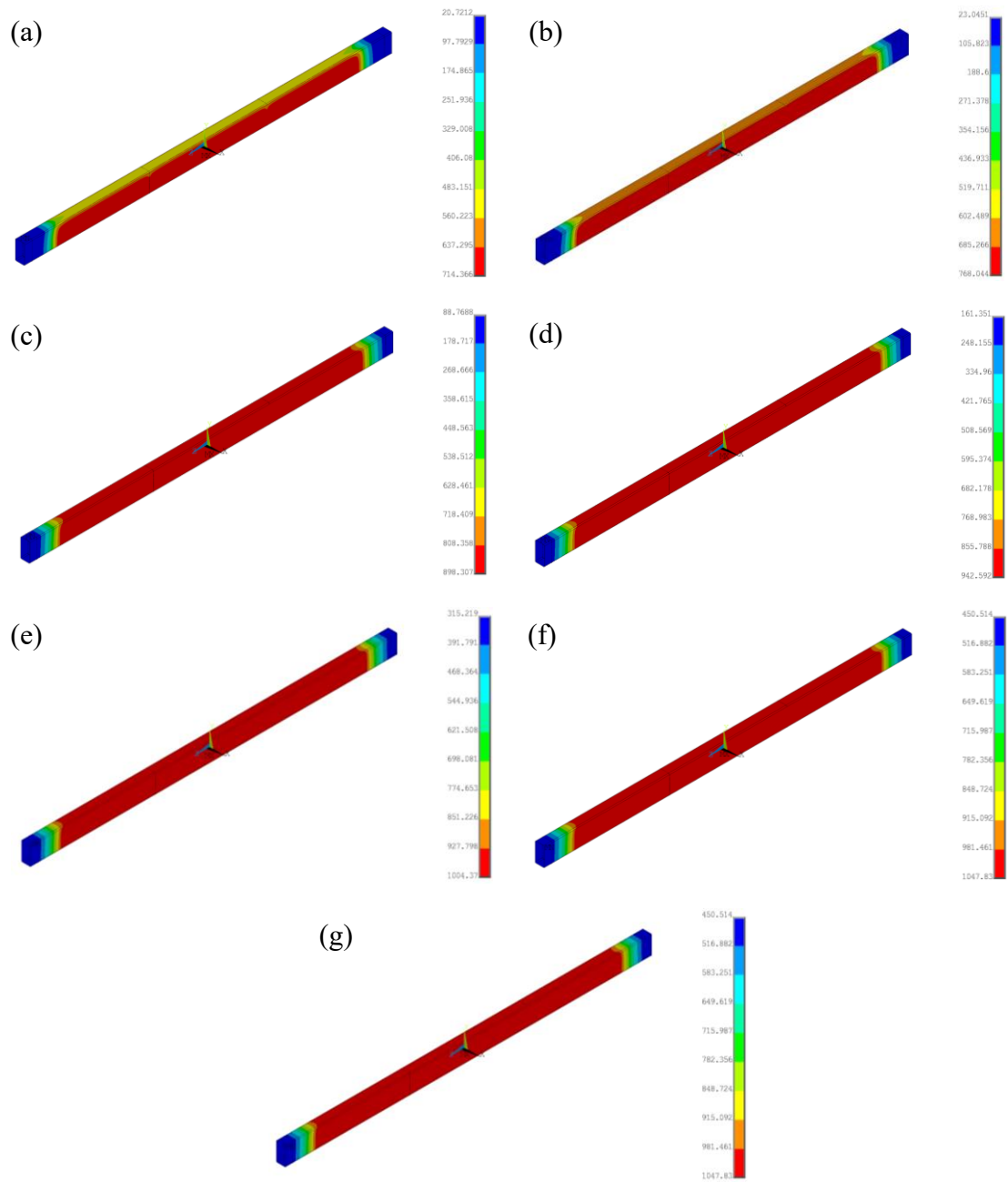
**Figura B.46 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



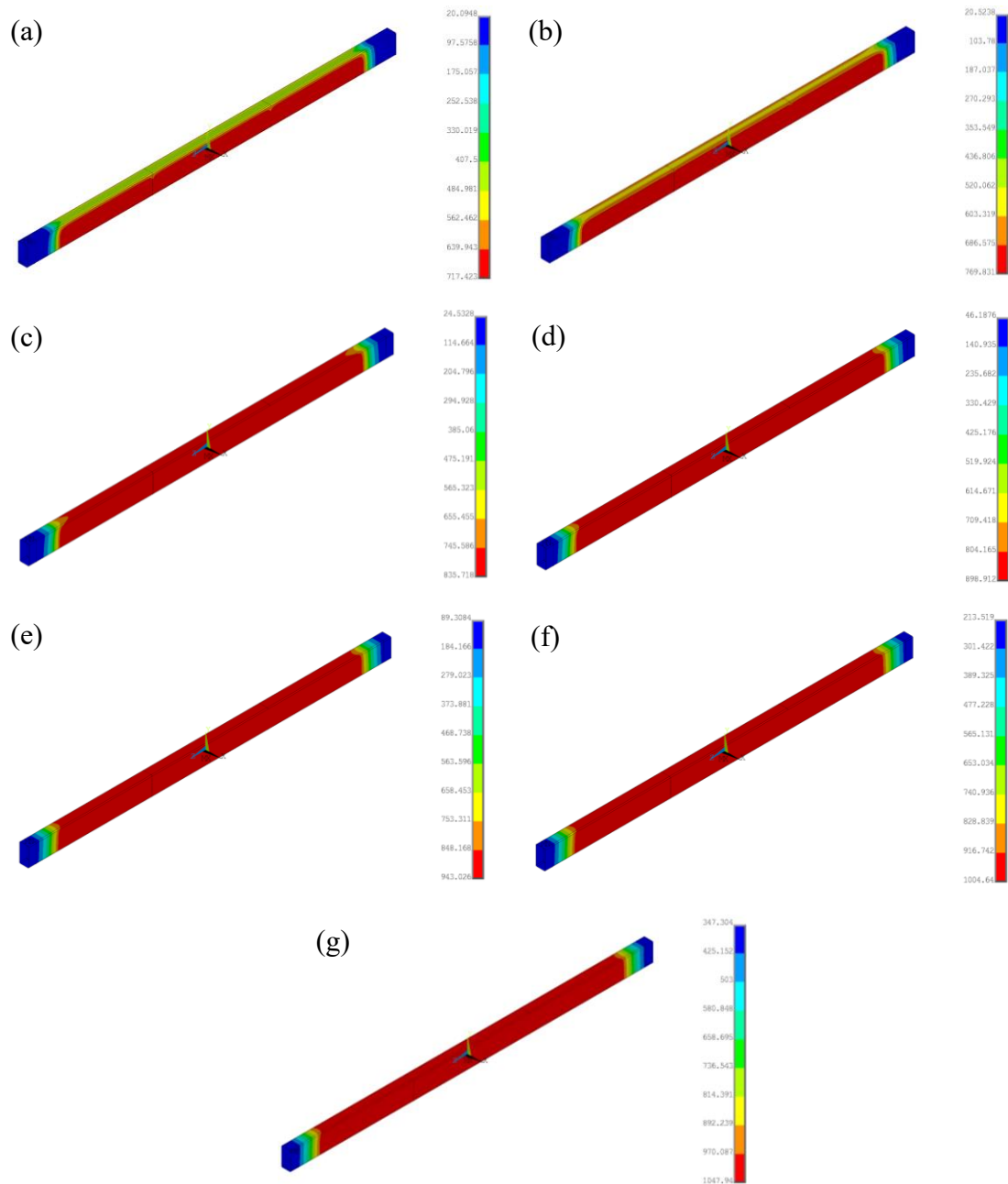
**Figura B.47 – Amostra RHS 180x100x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



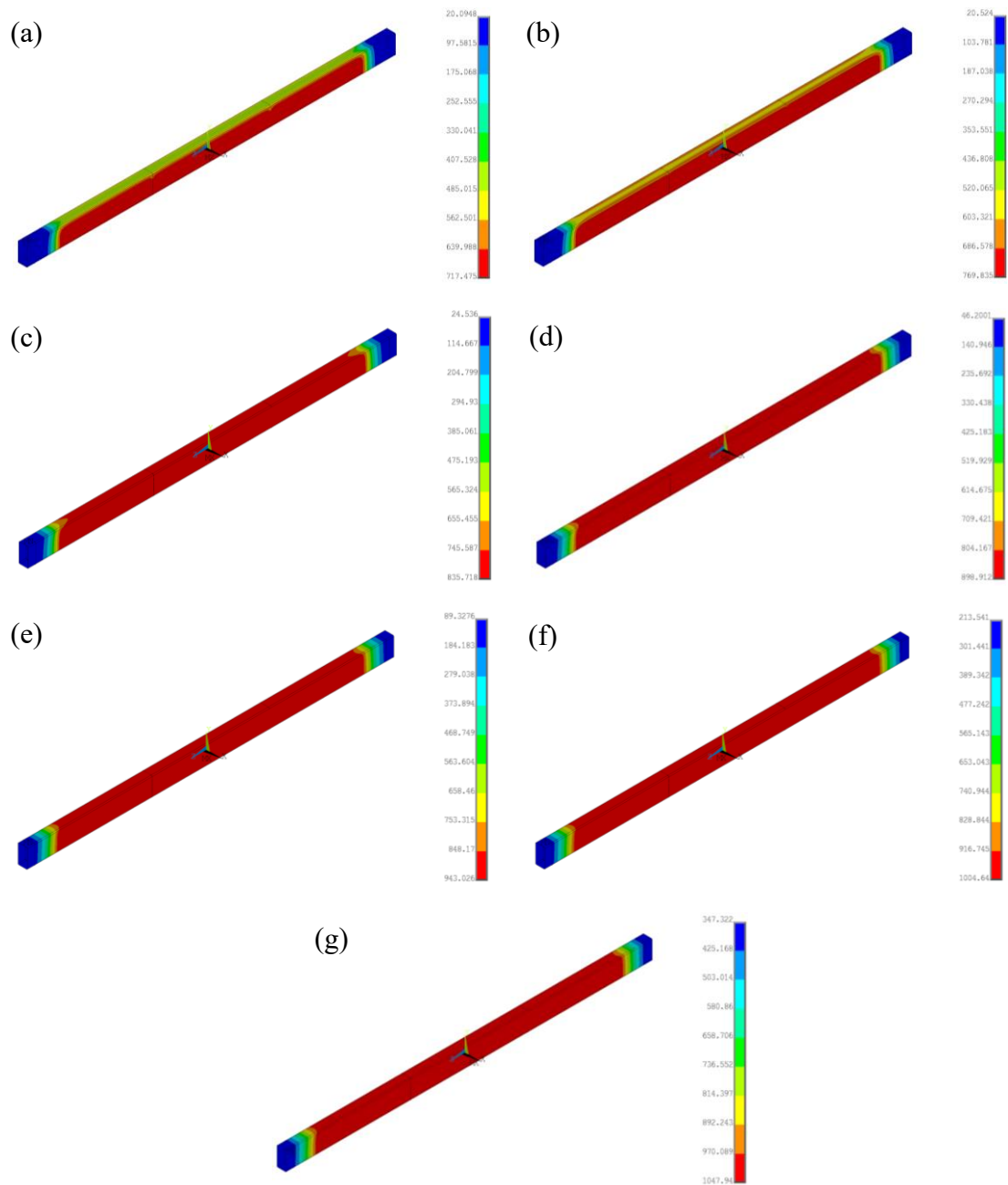
**Figura B.48 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



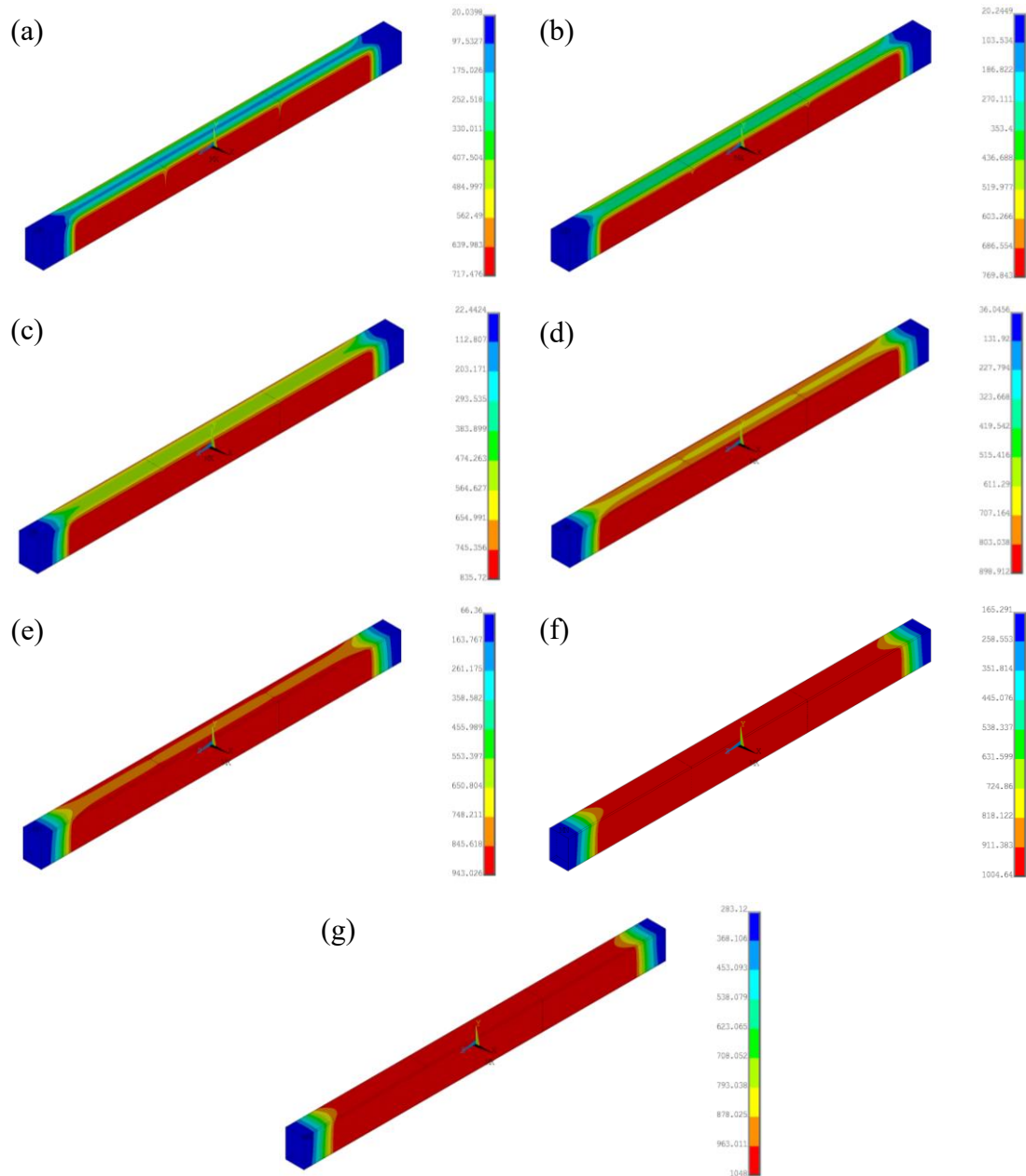
**Figura B.49 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



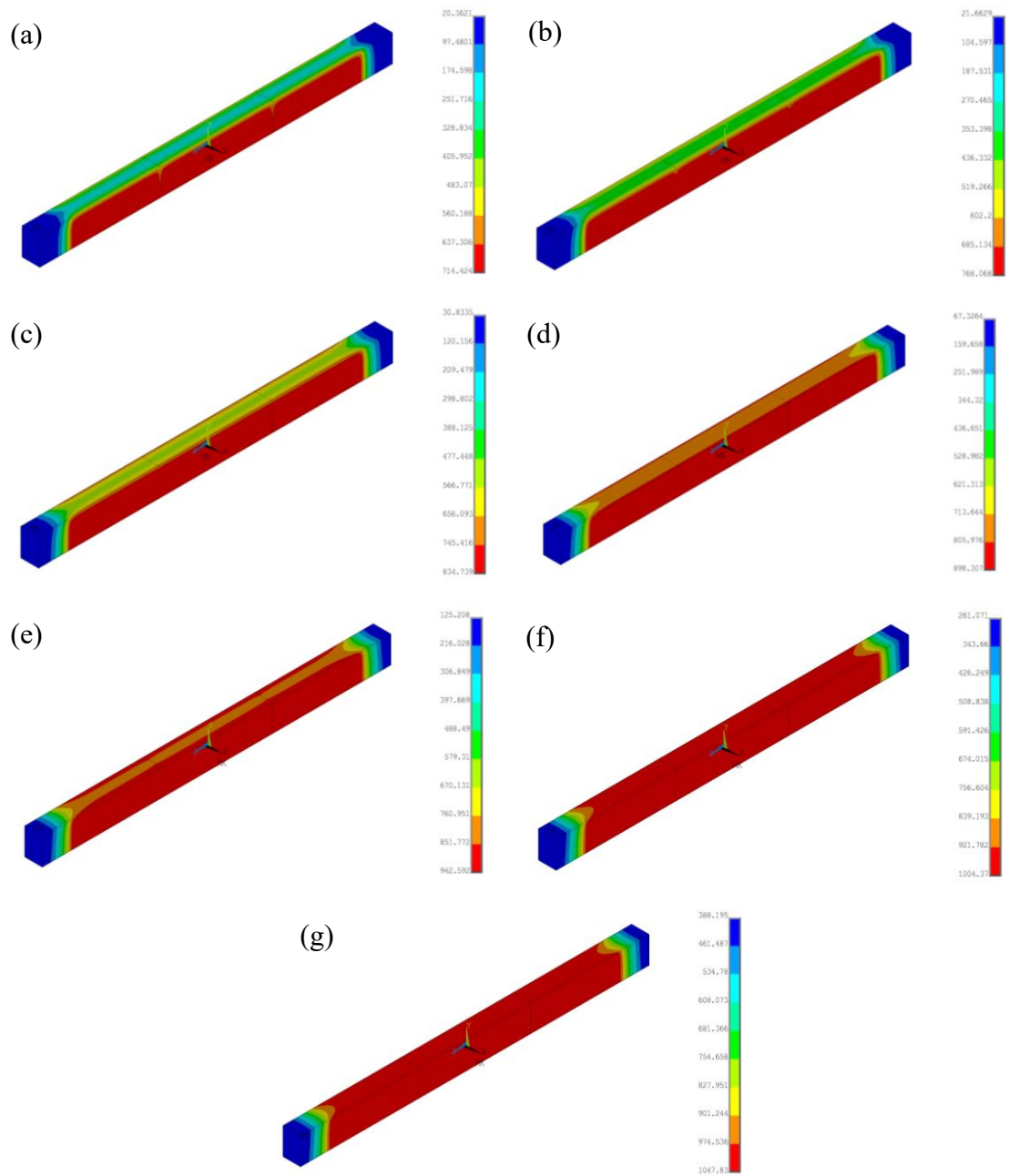
**Figura B.50 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



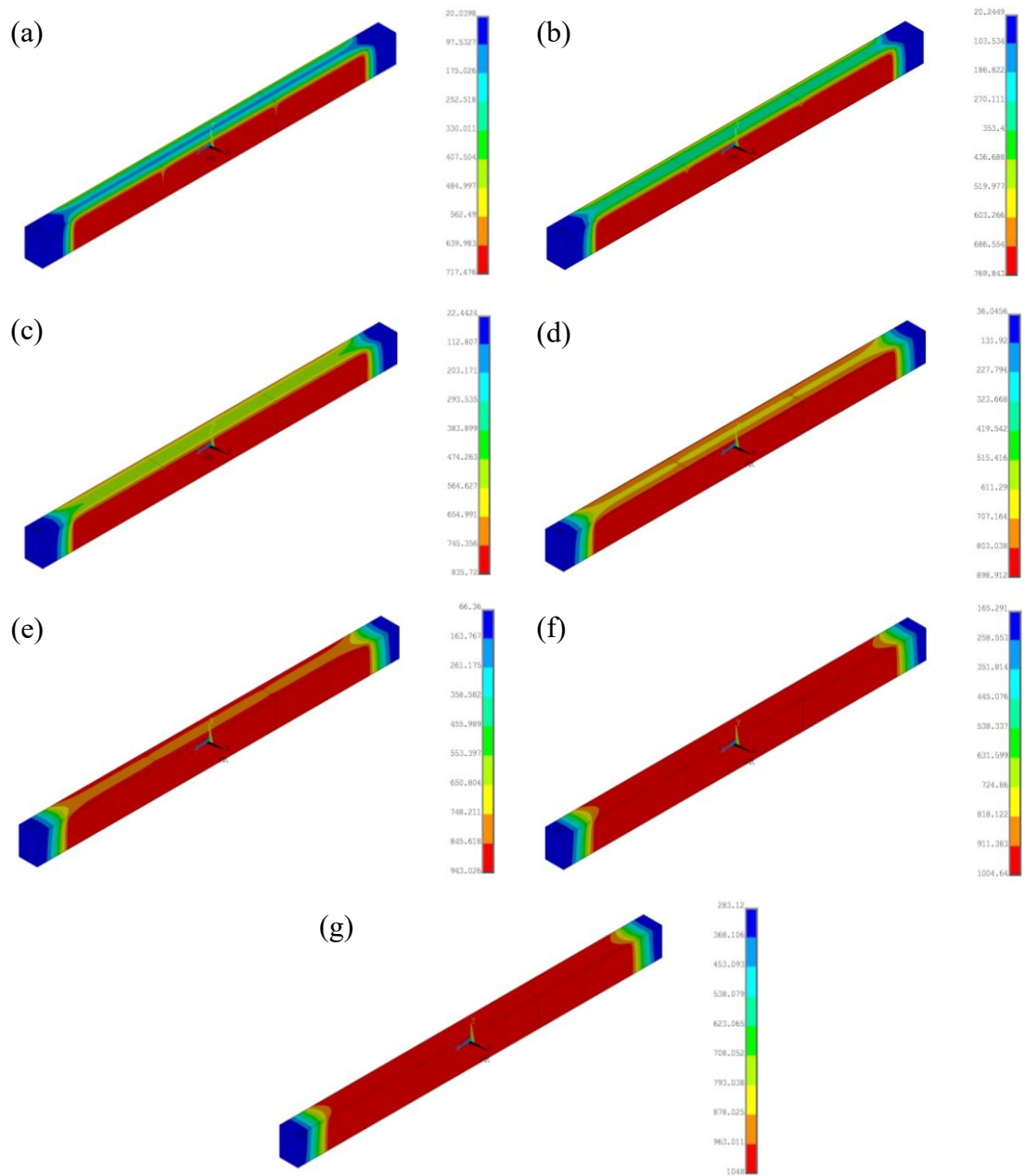
**Figura B.51 – Amostra RHS 200x100x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



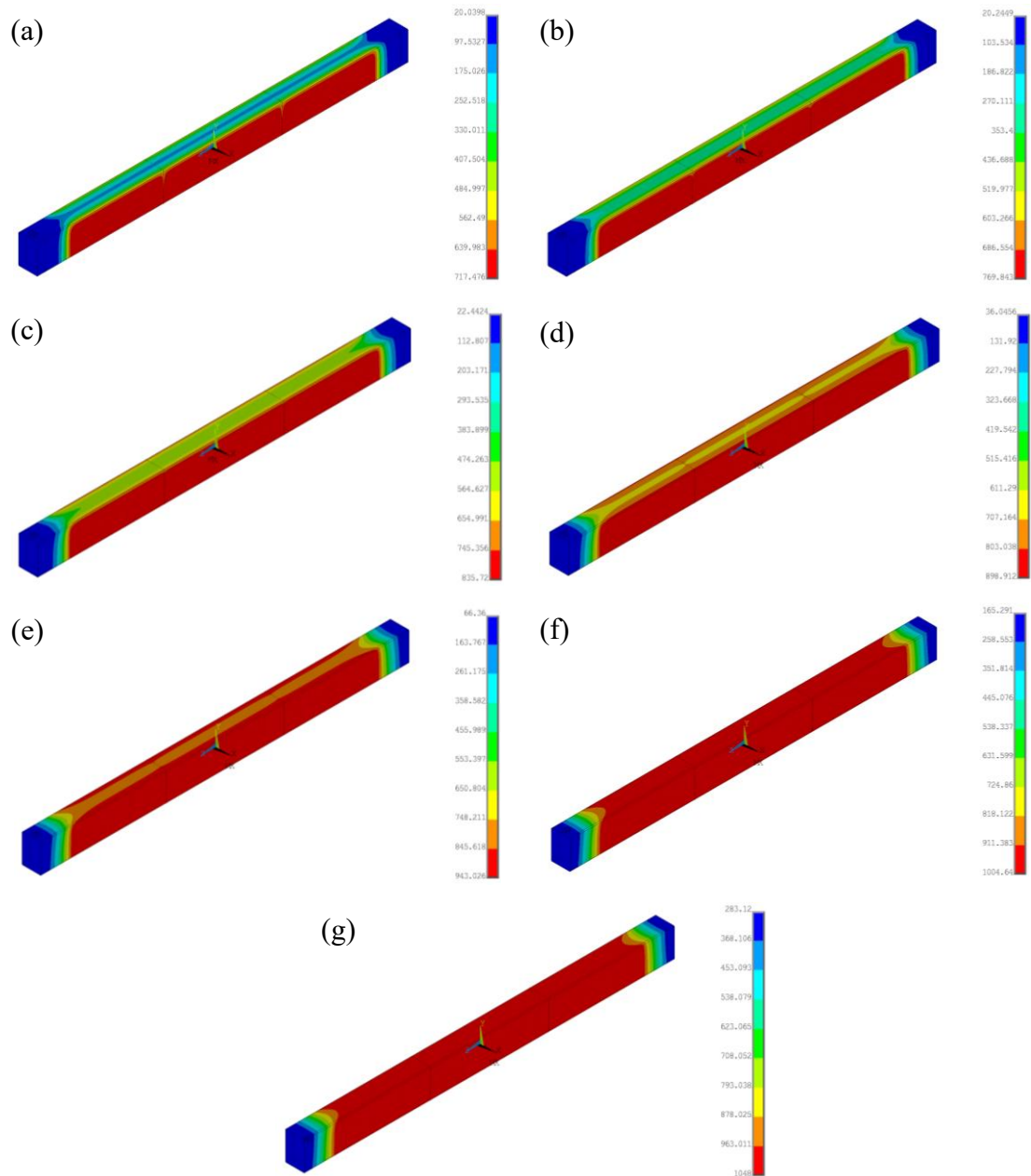
**Figura B.52 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



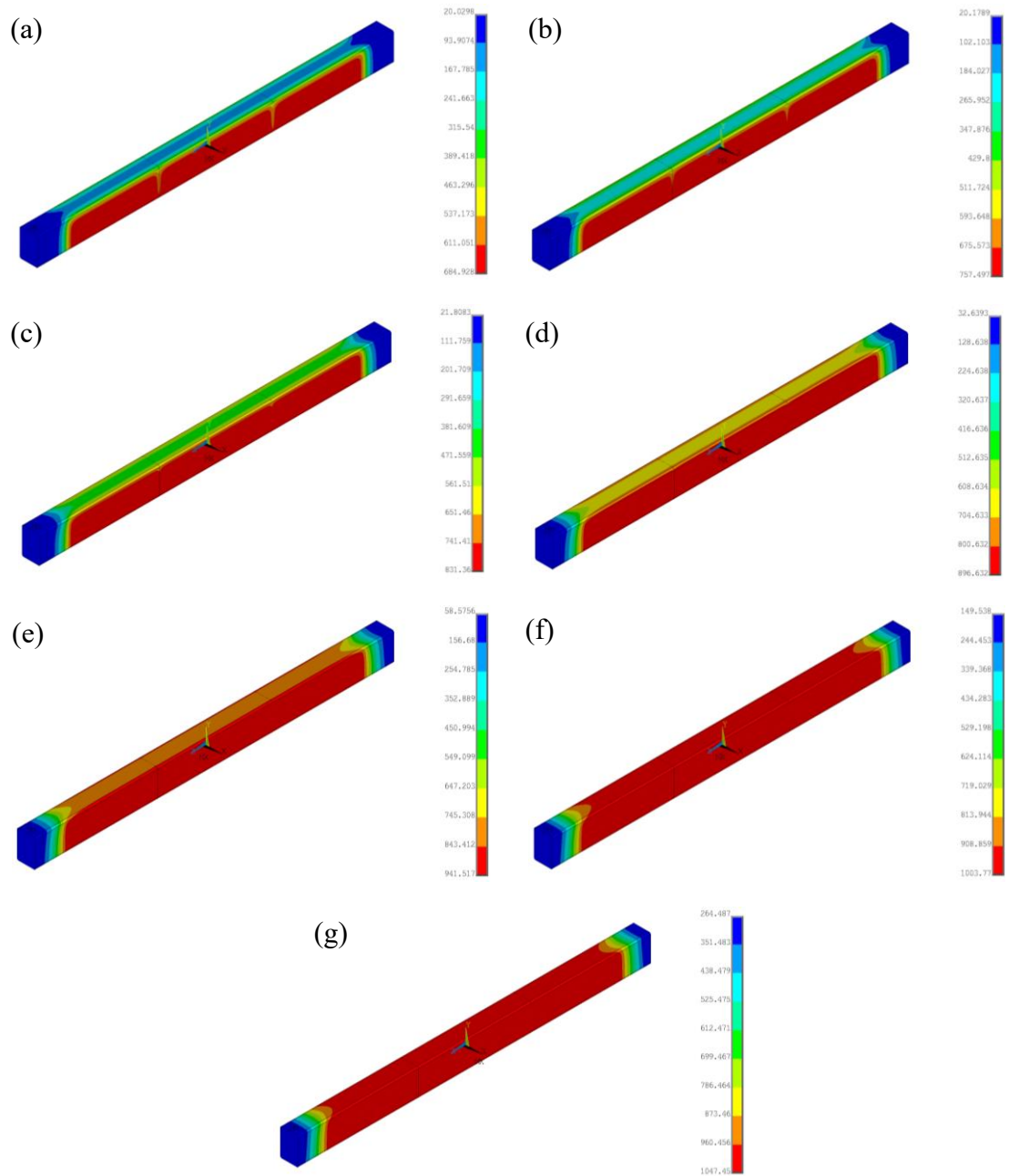
**Figura B.53 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



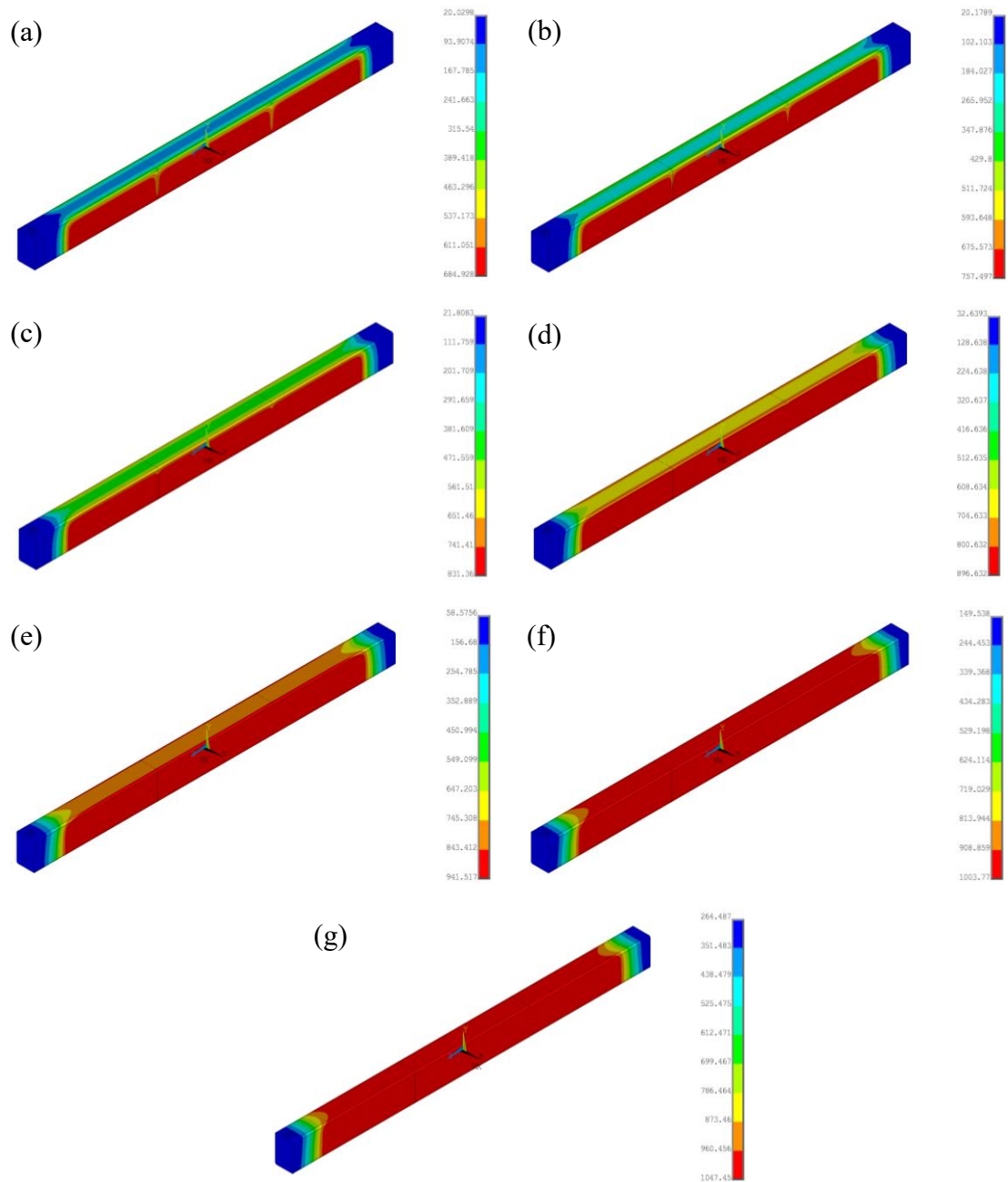
**Figura B.54 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



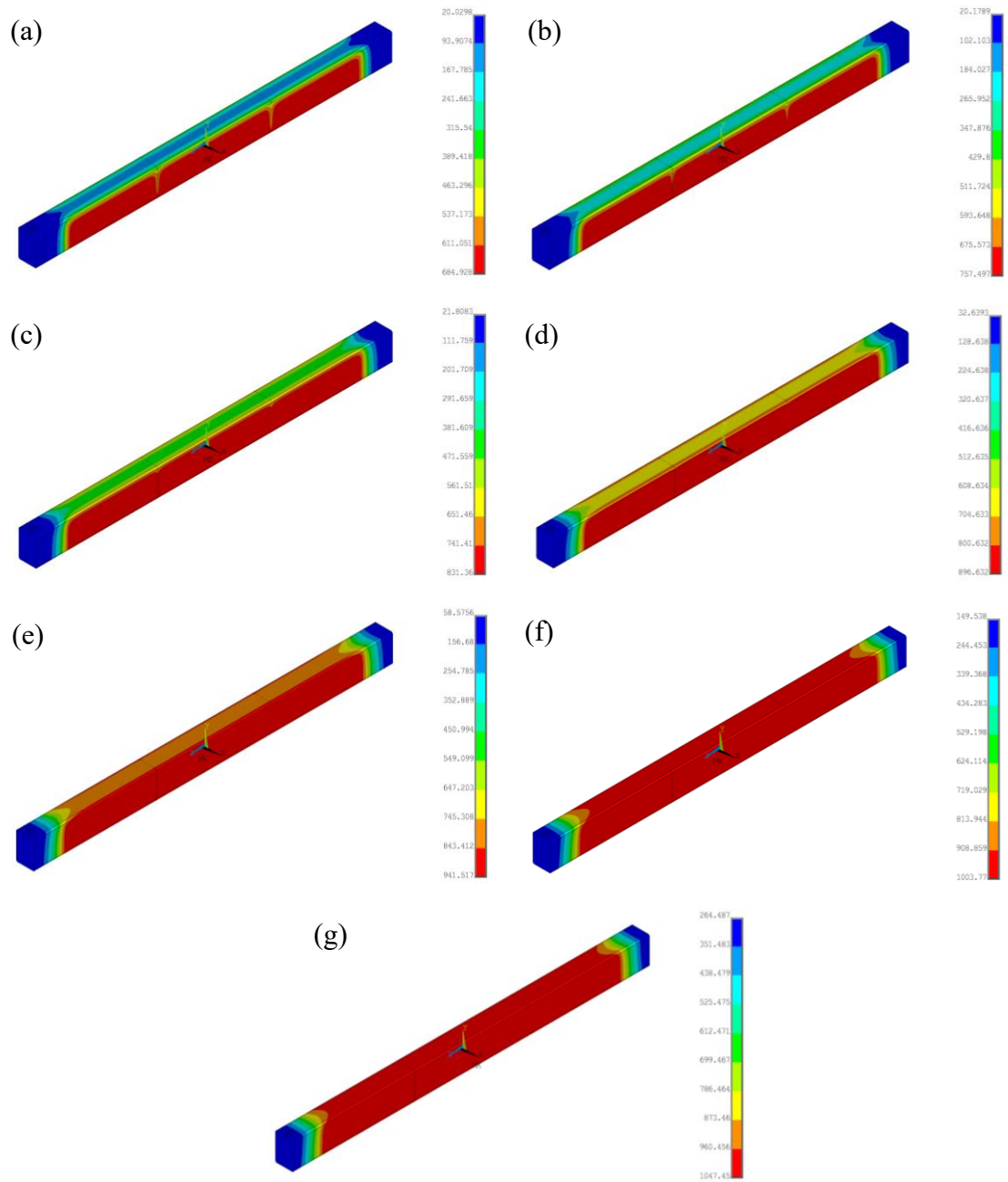
**Figura B.55 – Amostra RHS 300x200x5 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



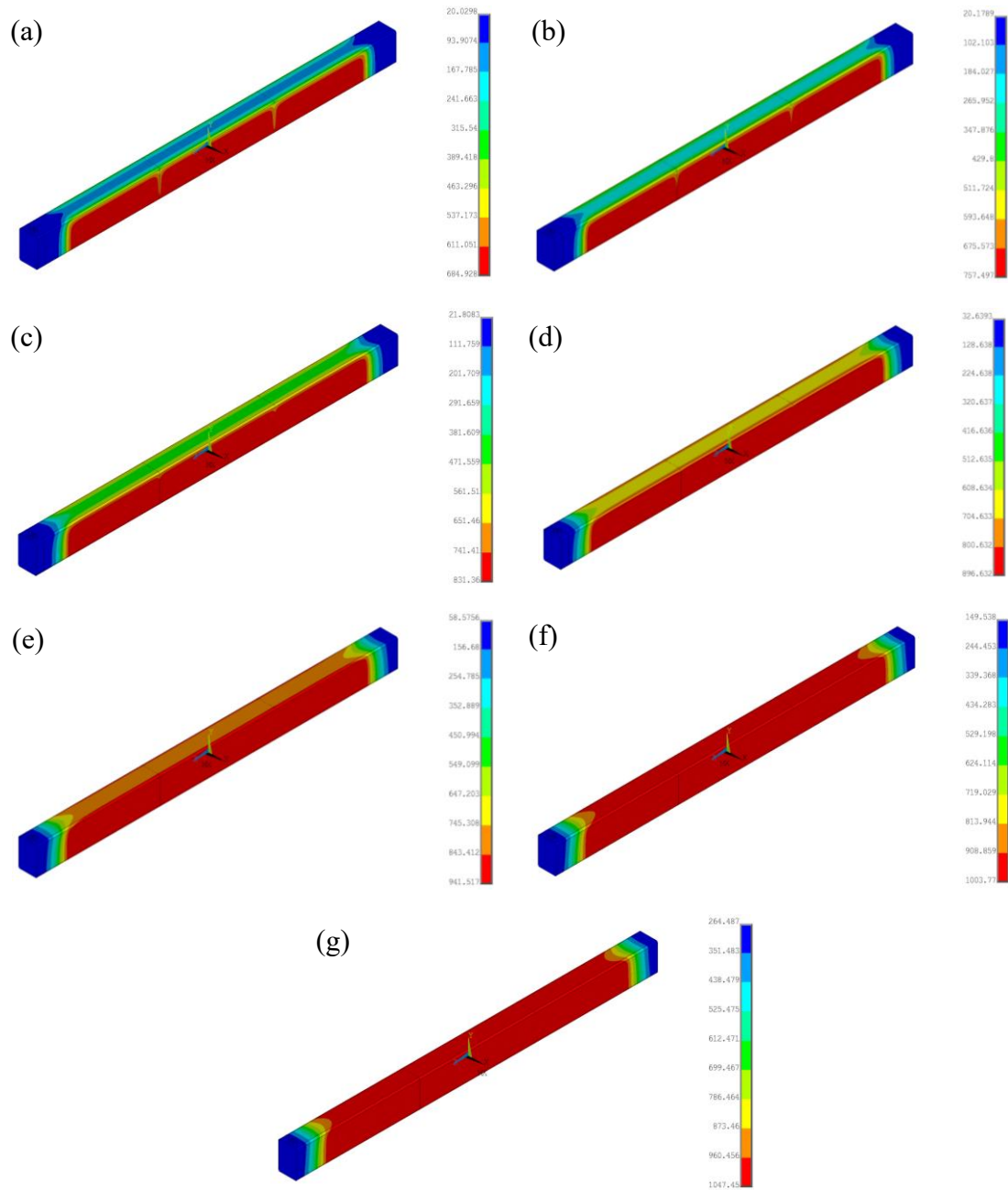
**Figura B.56 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4301 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



**Figura B.57 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4016 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



**Figura B.58 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4571 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**



**Figura B.59 – Amostra RHS 300x200x8 material 1.4462 temperatura no tempo de (a) 900, (b) 1200, (c) 1800, (d) 2700, (e) 3600, (f) 5400 e (g) 7200 segundos.**

### B.3. Resultados Termomecânicos

Os tempos de simulações estão descritos na Tabela 8.

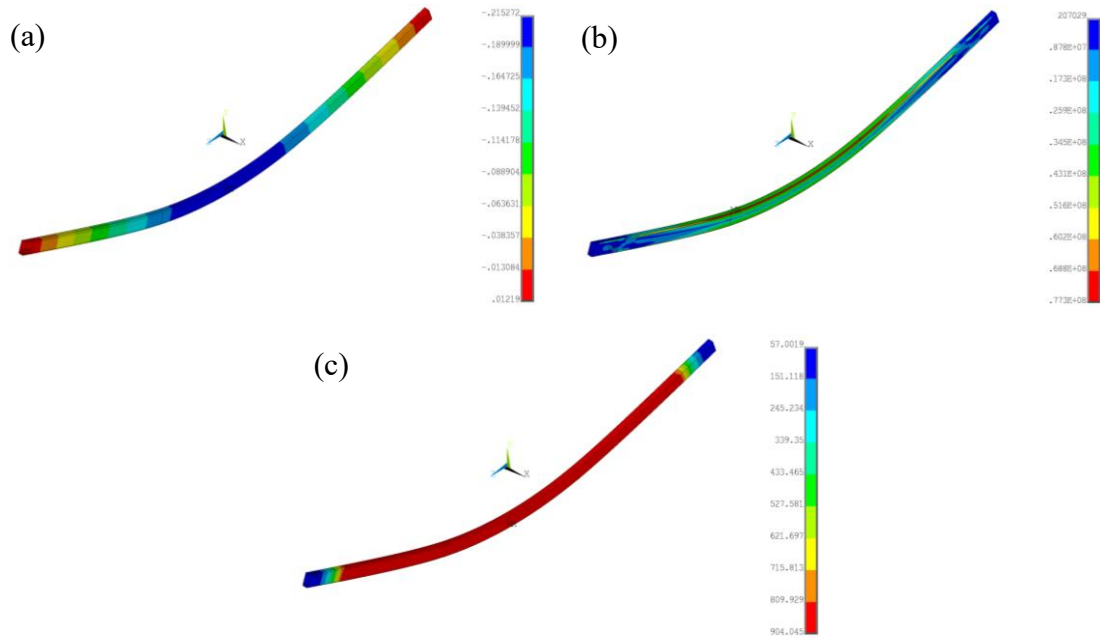


Figura B.60 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

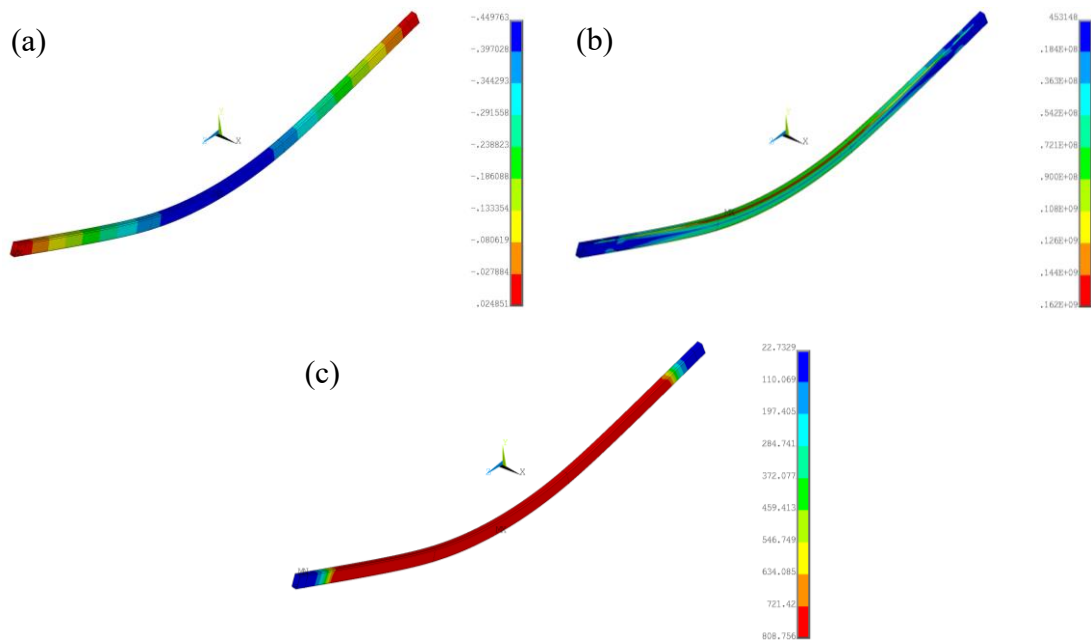


Figura B.61 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

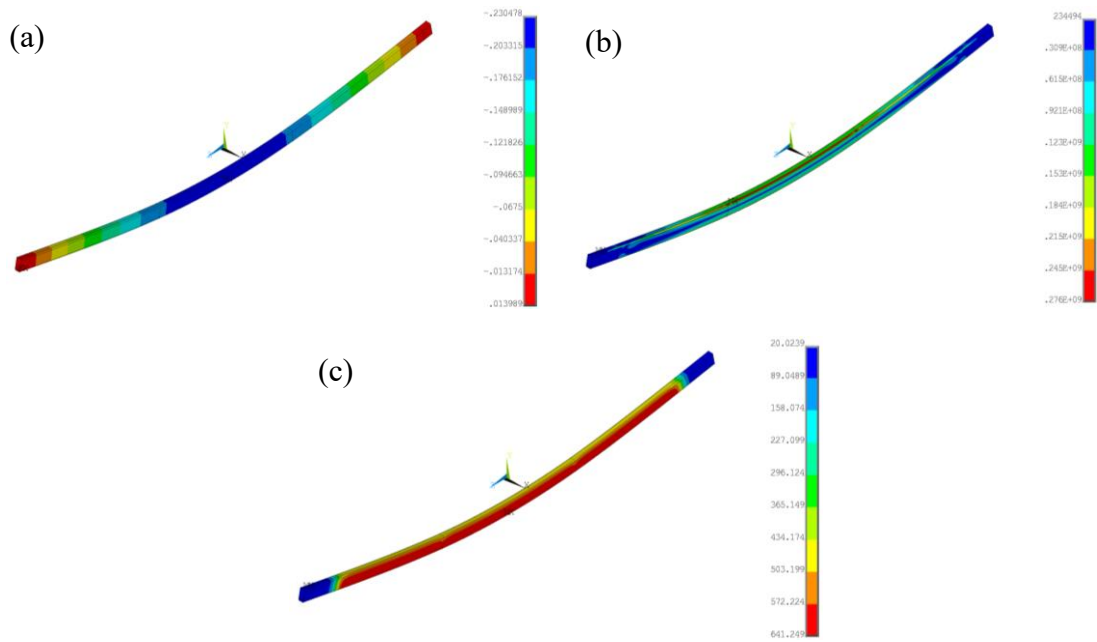


Figura B.62 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

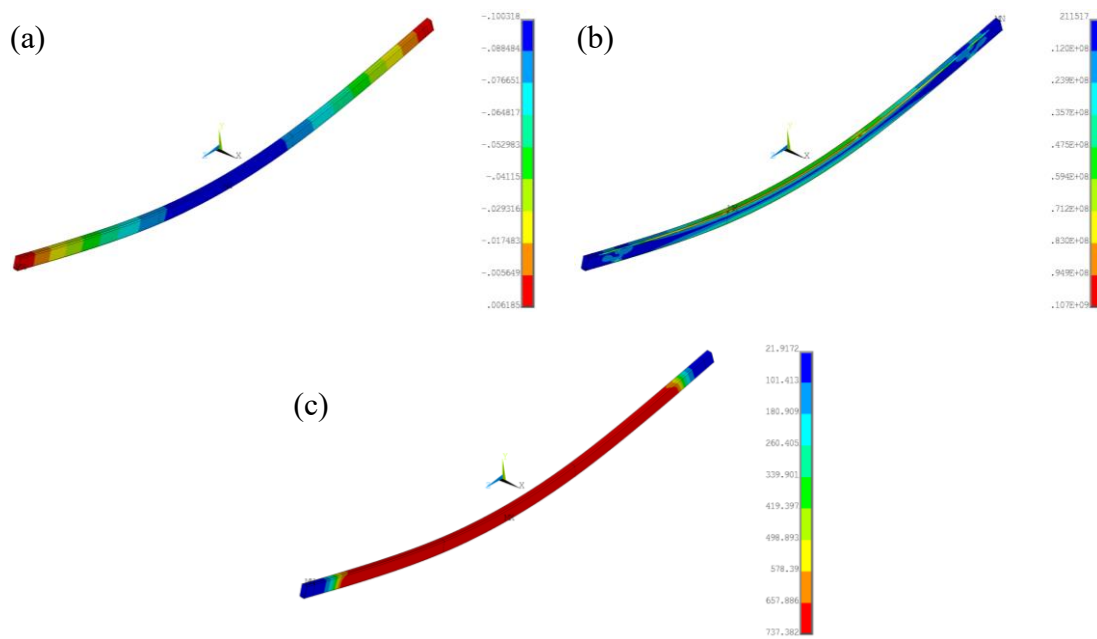


Figura B.63 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

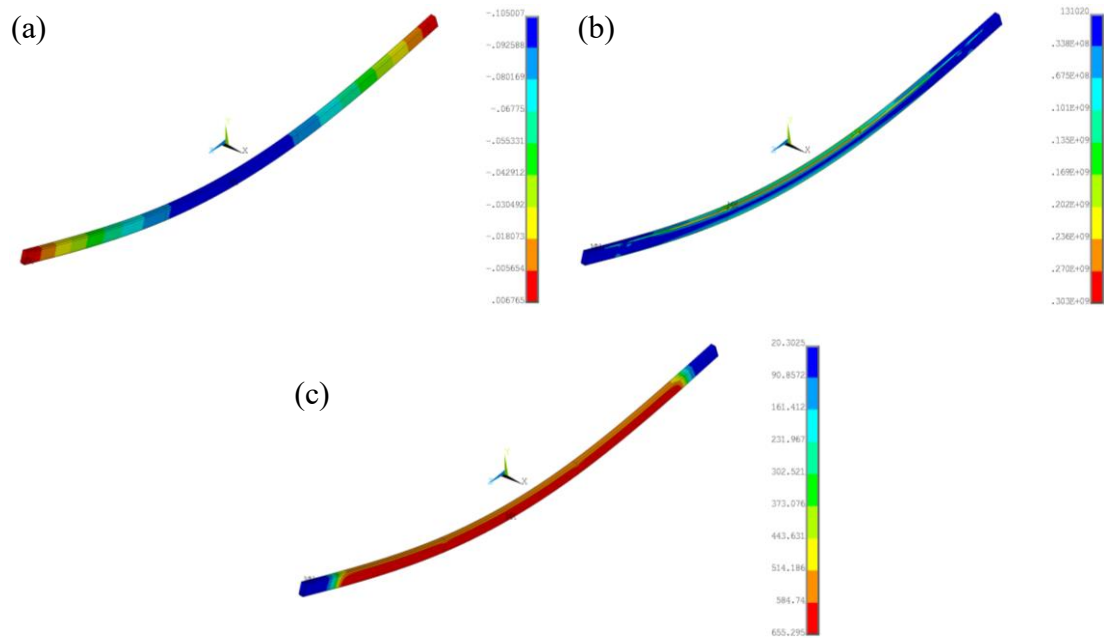


Figura B.64 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

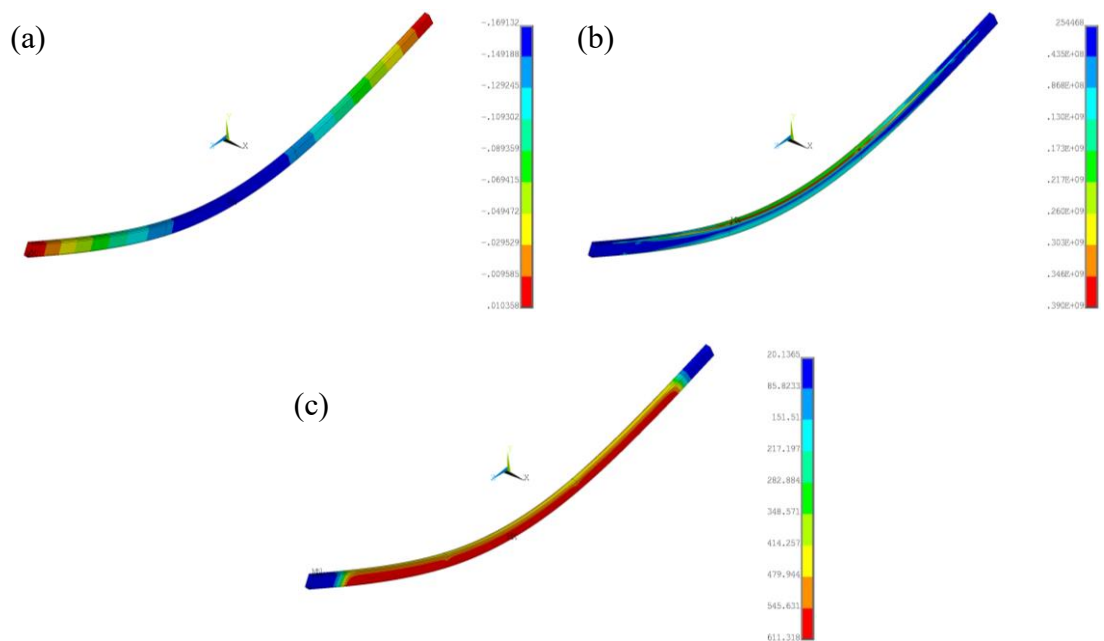


Figura B.65 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

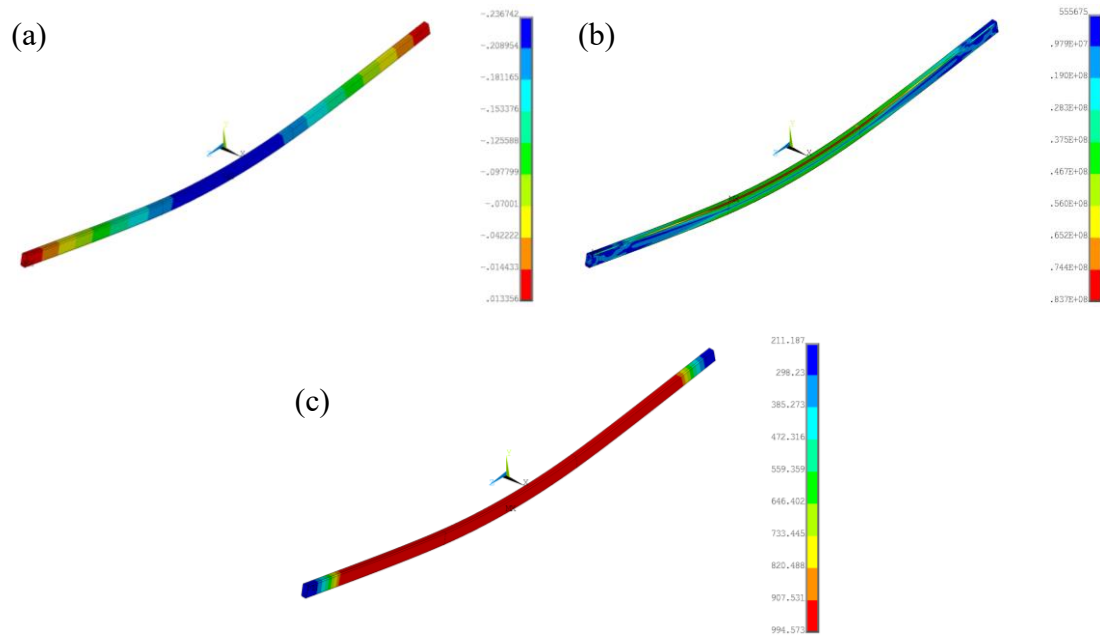


Figura B.66 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

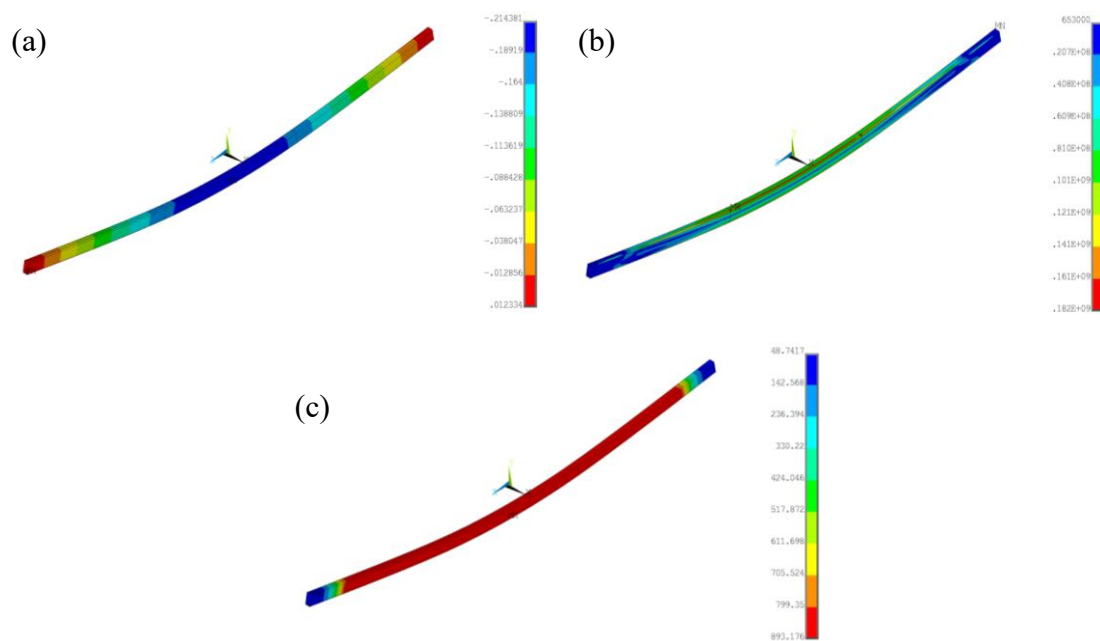


Figura B.67 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

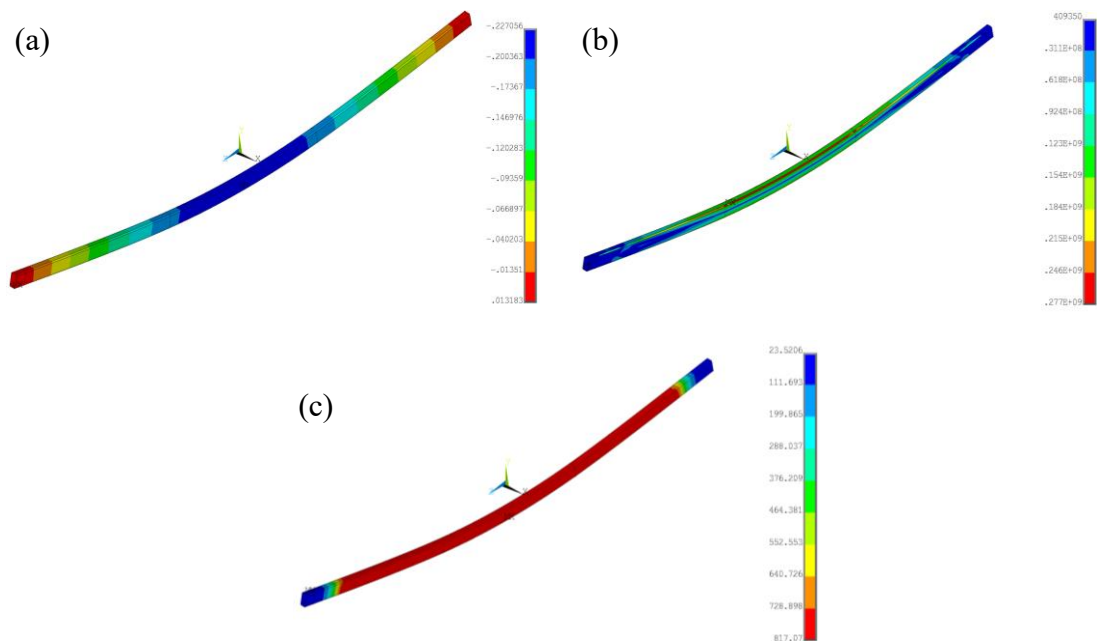


Figura B.68 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

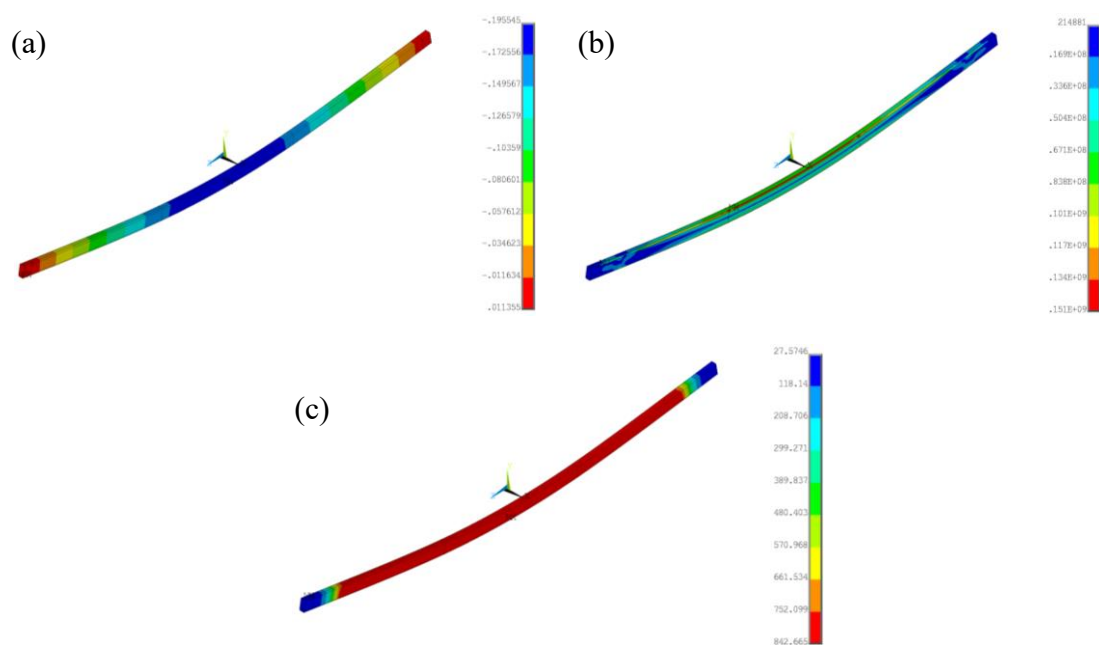
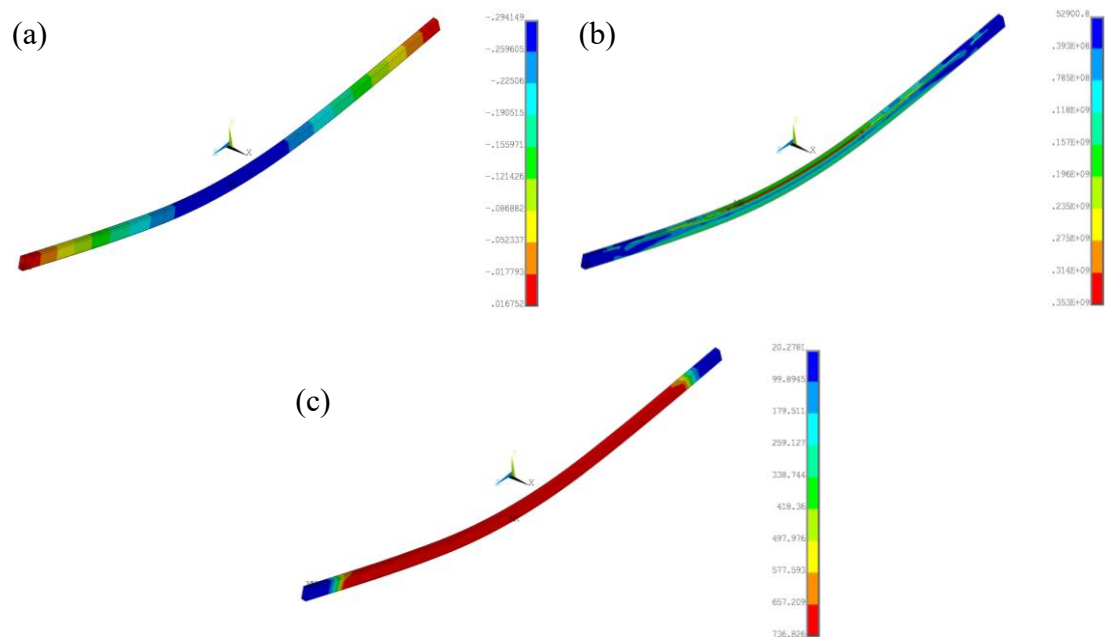
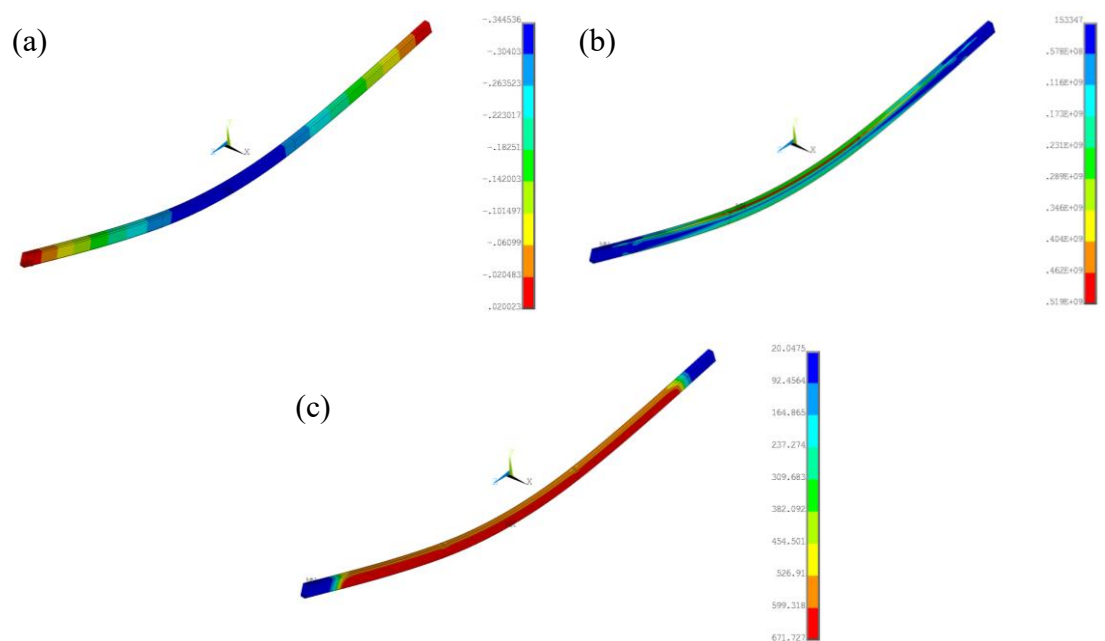


Figura B.69 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.



**Figura B.70 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.71 – Amostra RHS100x50x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**

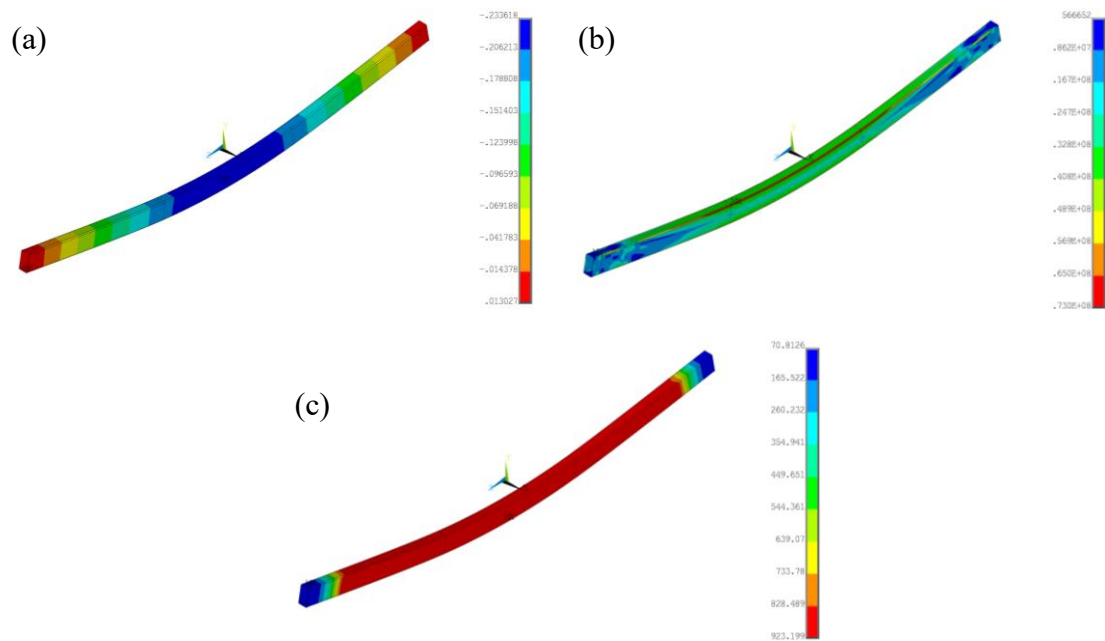


Figura B.72 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

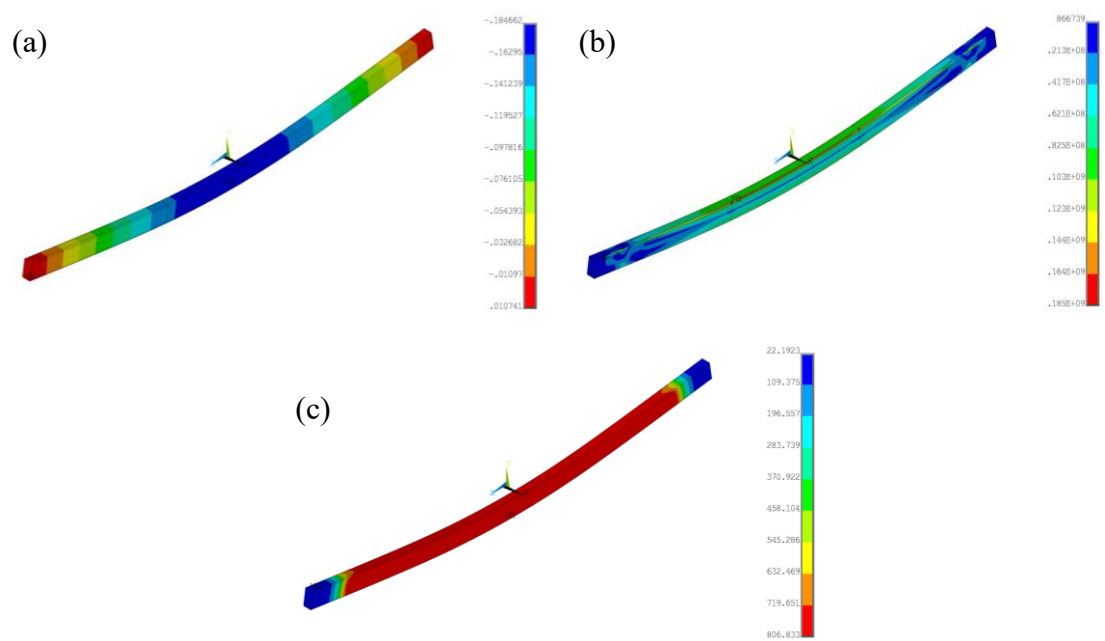


Figura B.73 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

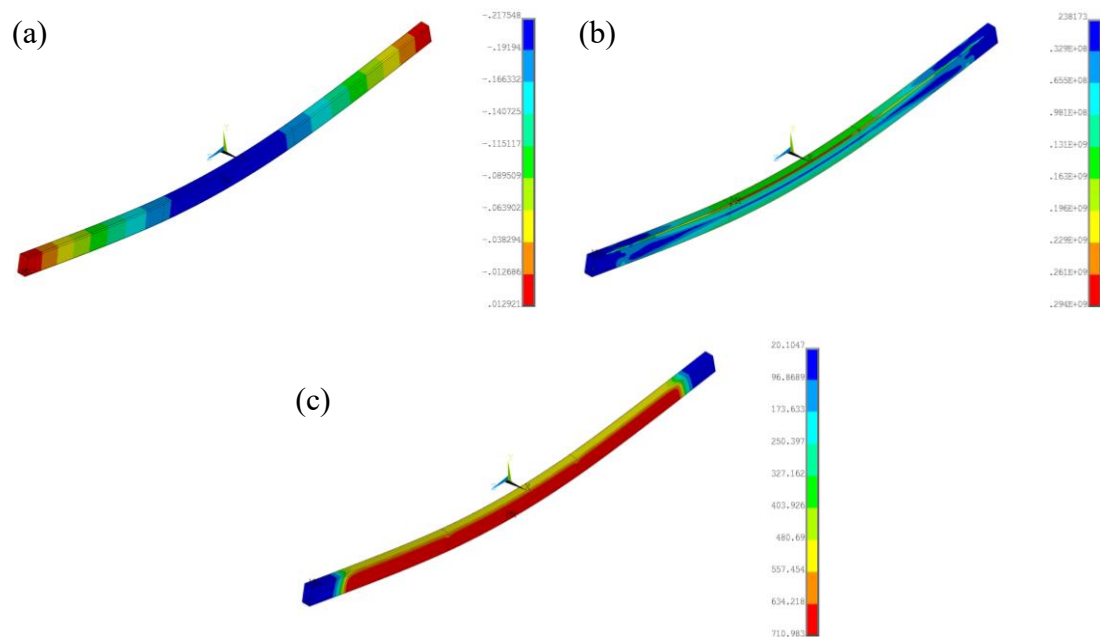


Figura B.74 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

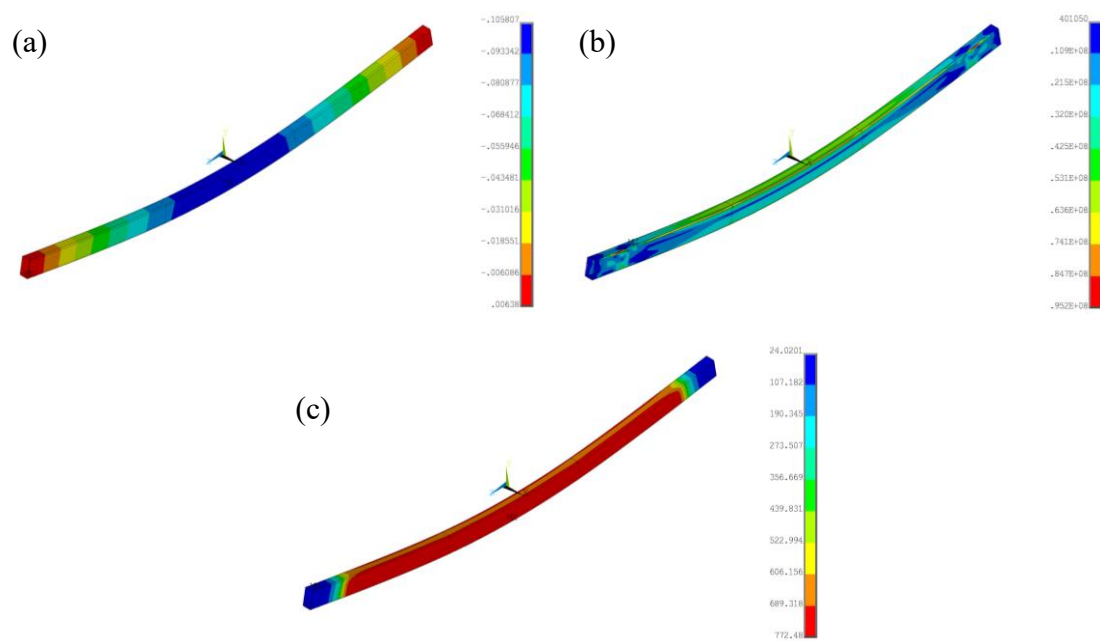


Figura B.75 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

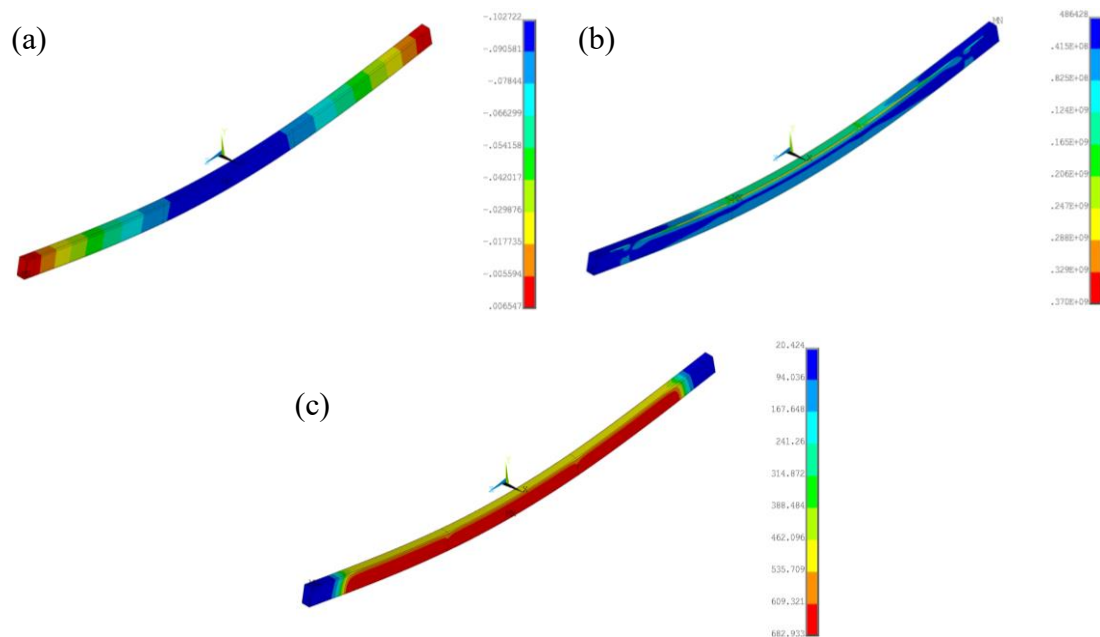


Figura B.76 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

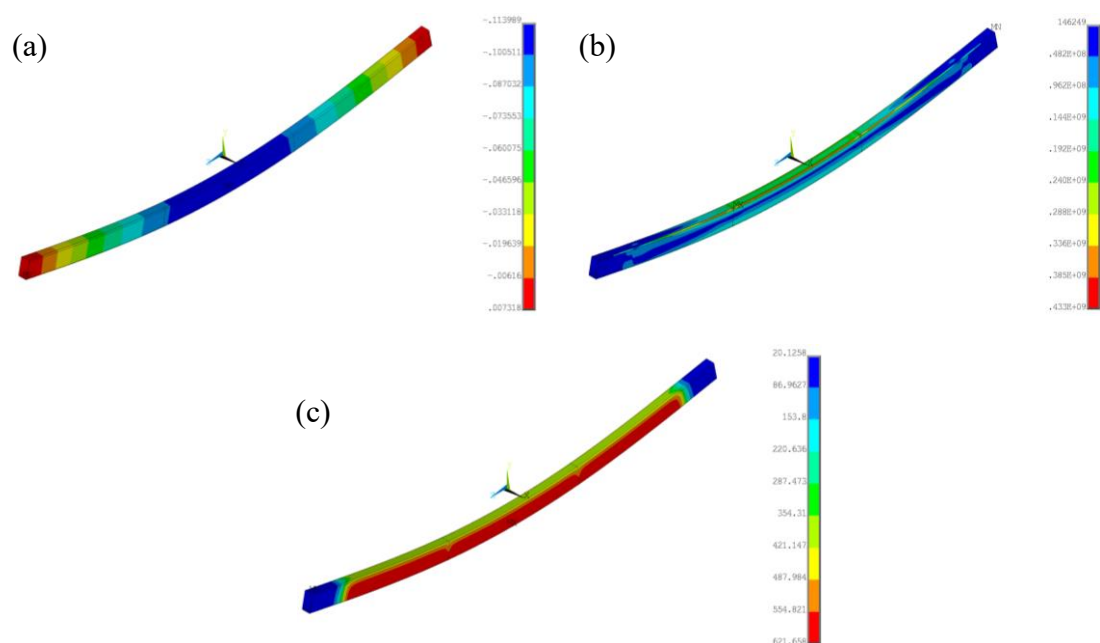


Figura B.77 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

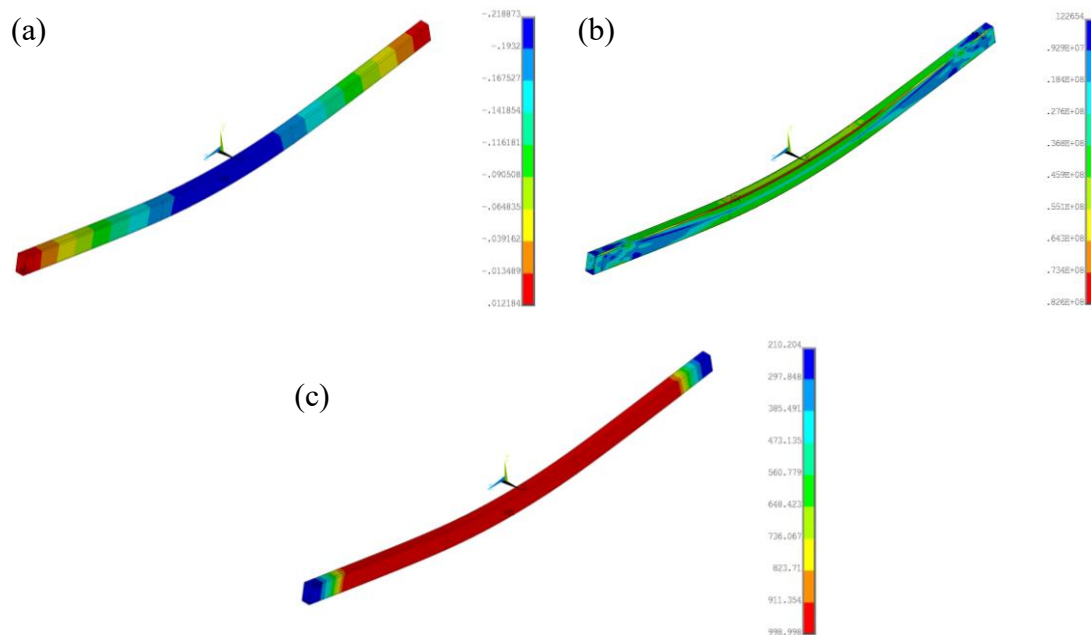


Figura B.78 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

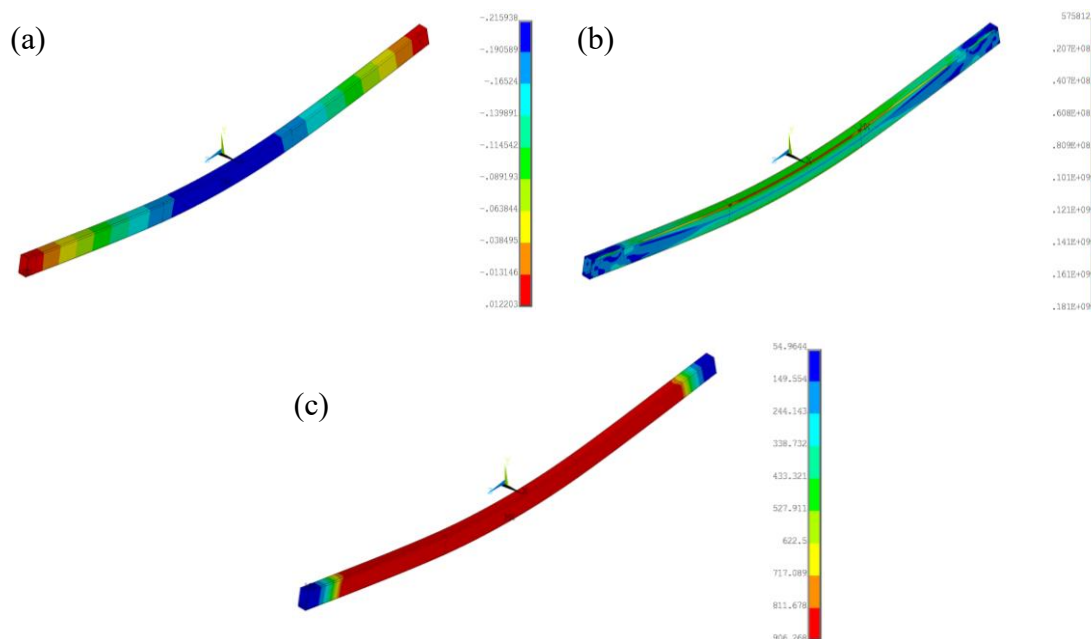


Figura B.79 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

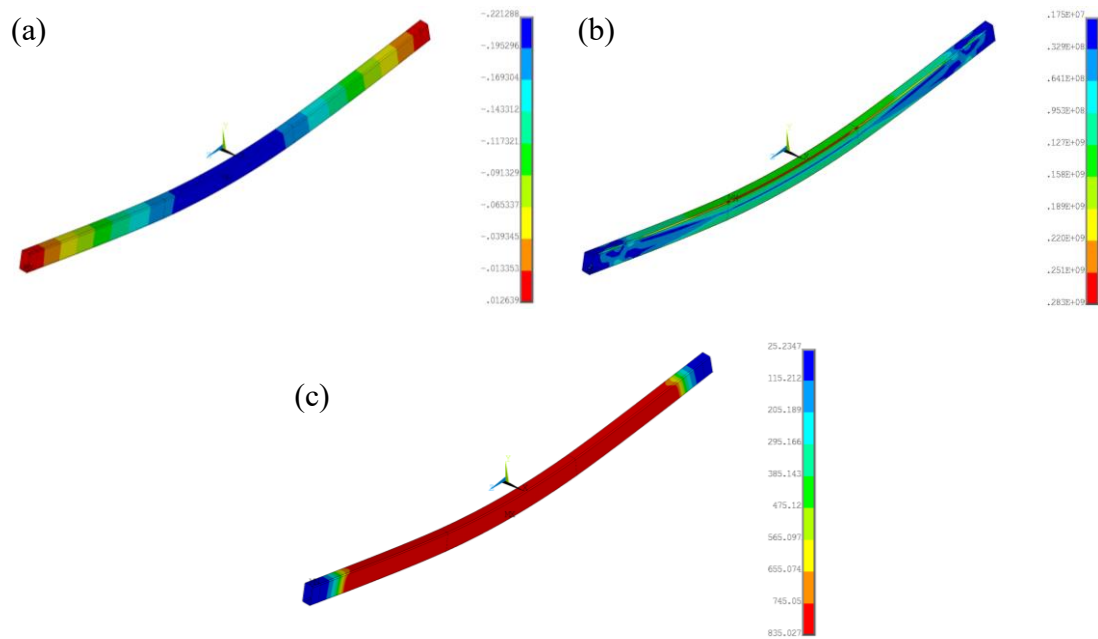


Figura B.80 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

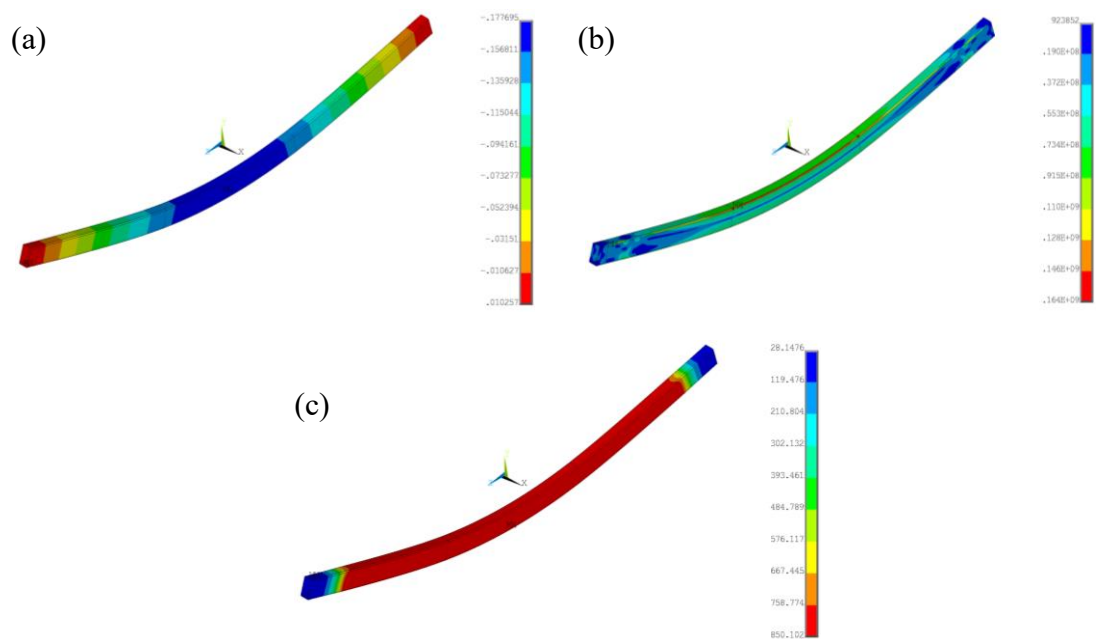


Figura B.81 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

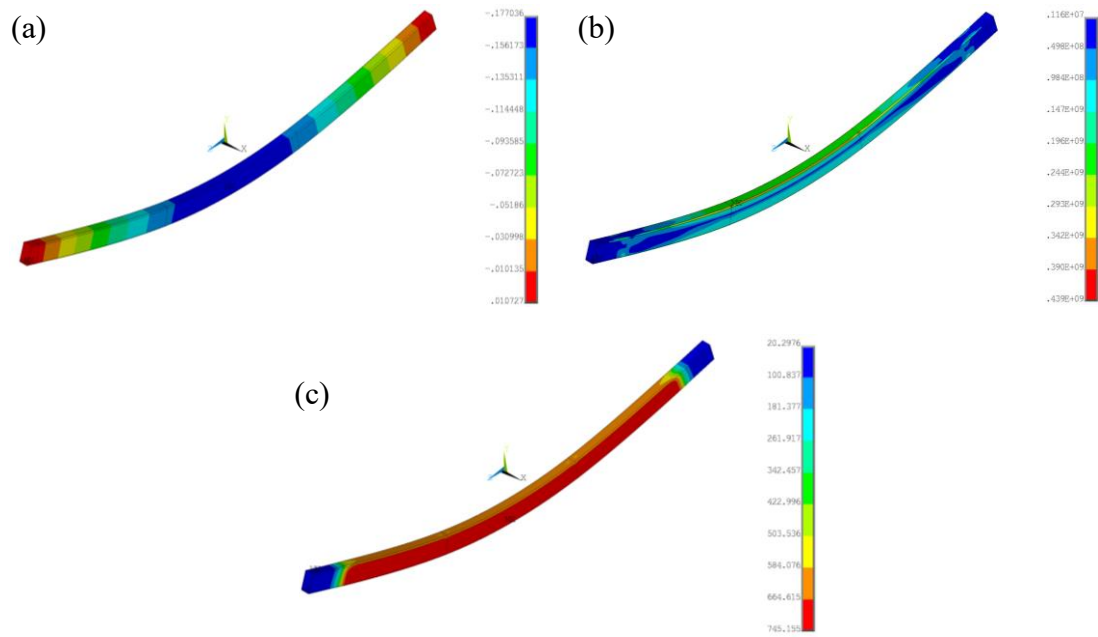


Figura B.82 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

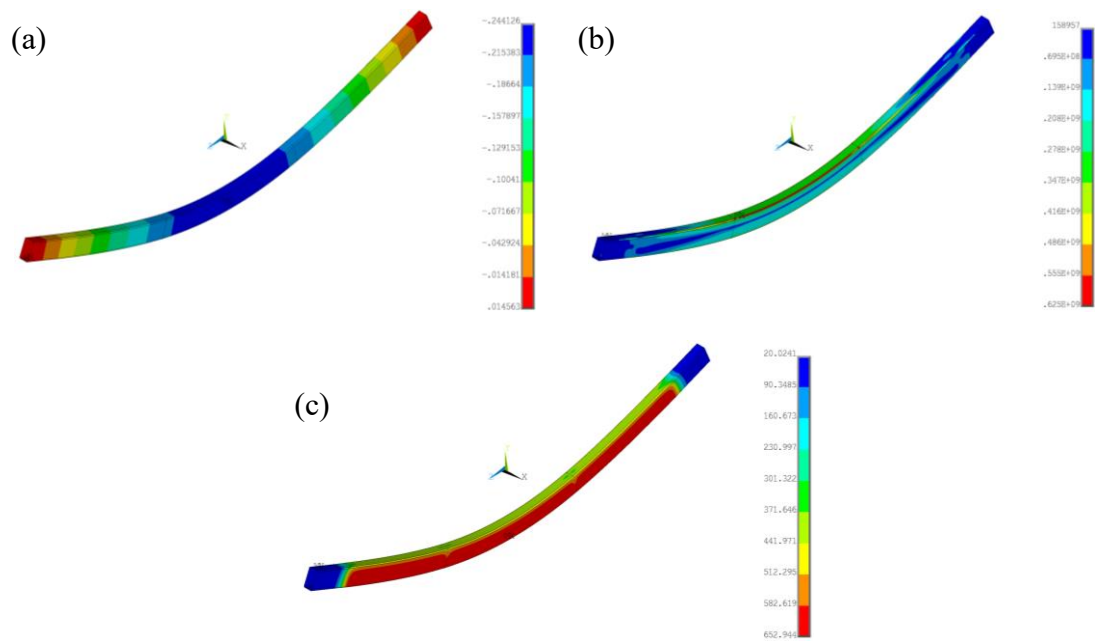
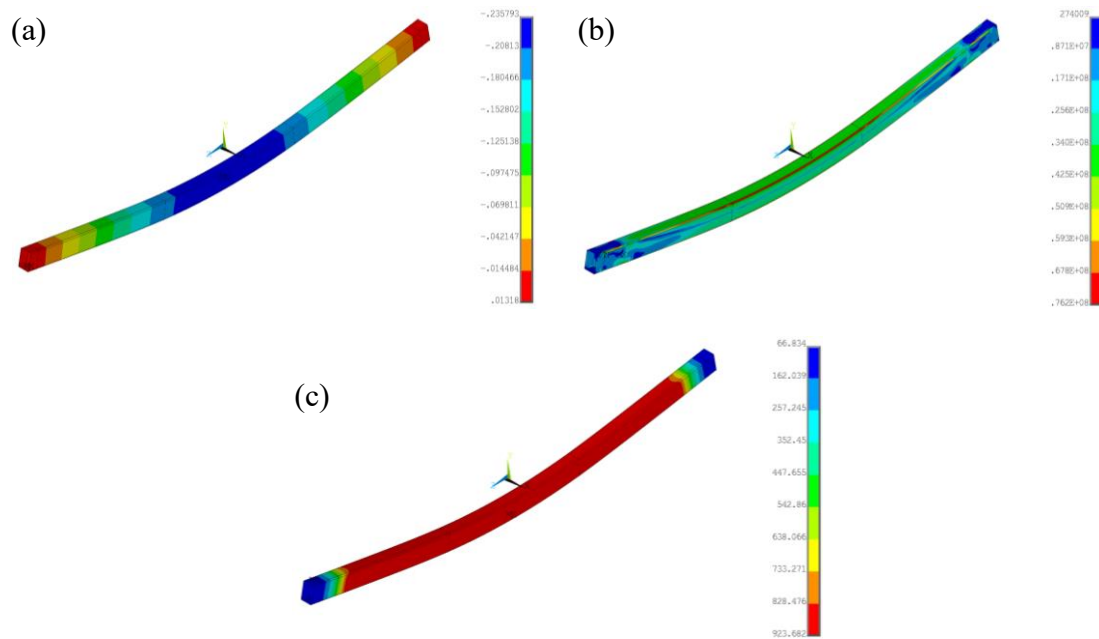
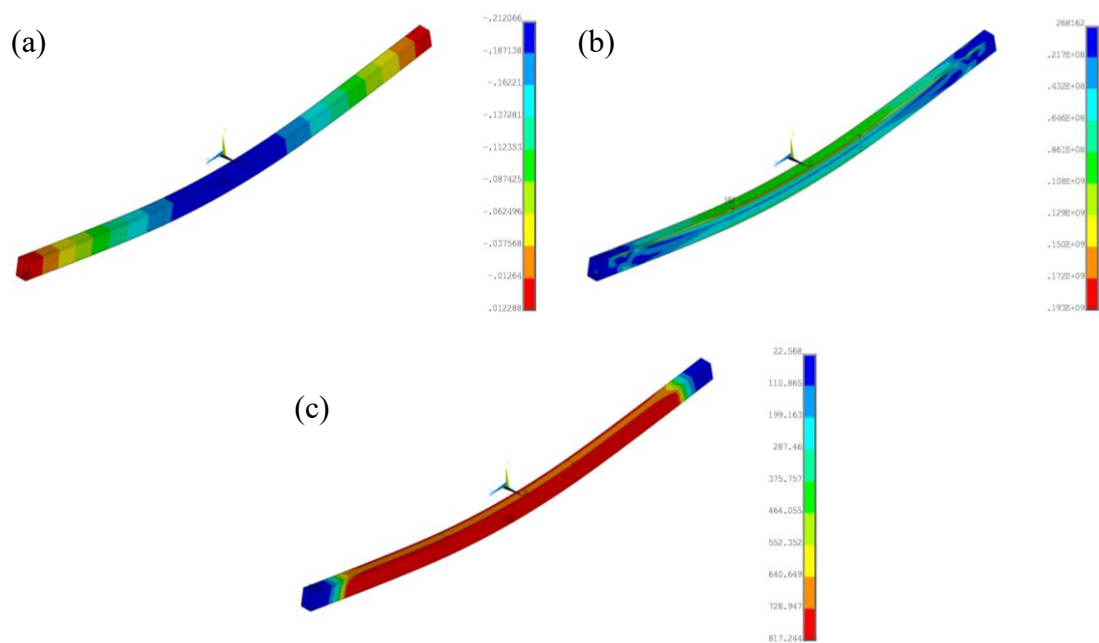


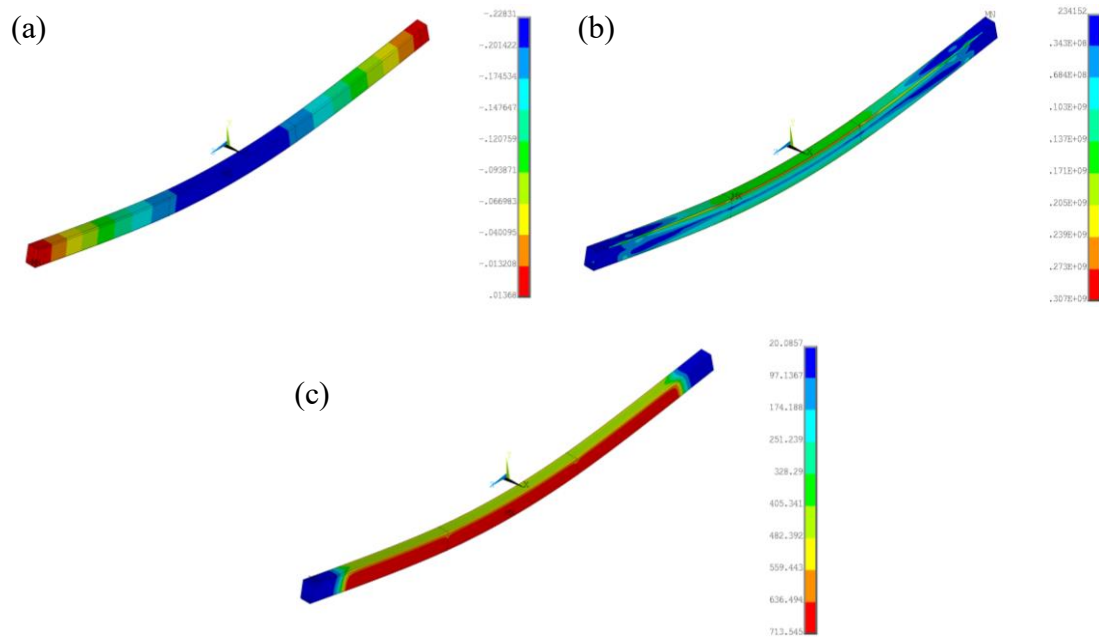
Figura B.83 – Amostra RHS150x80x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.



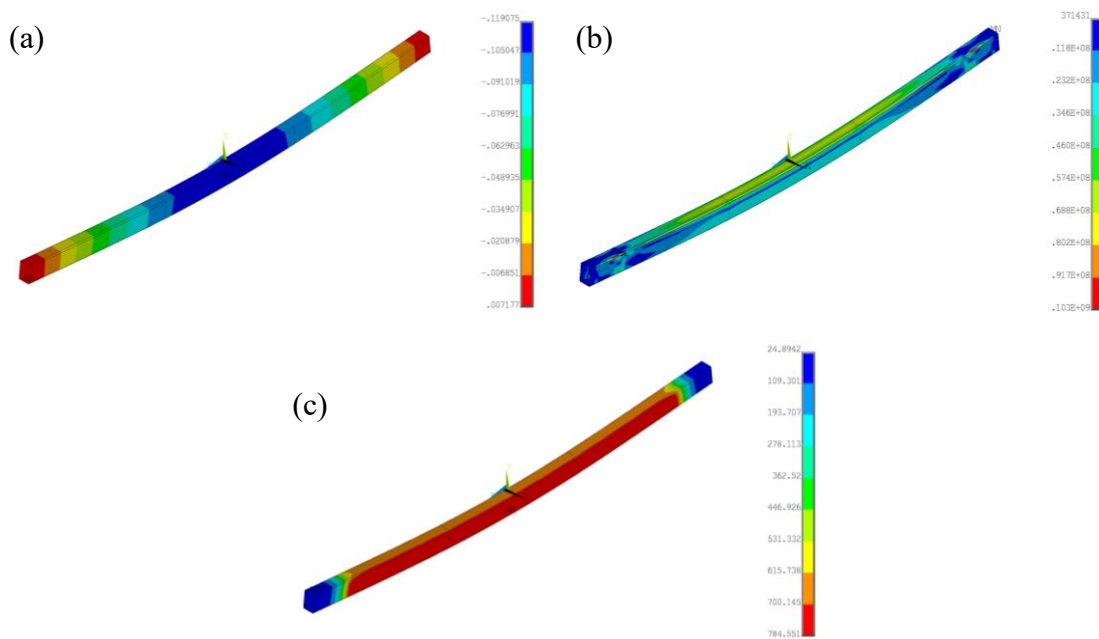
**Figura B.84 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



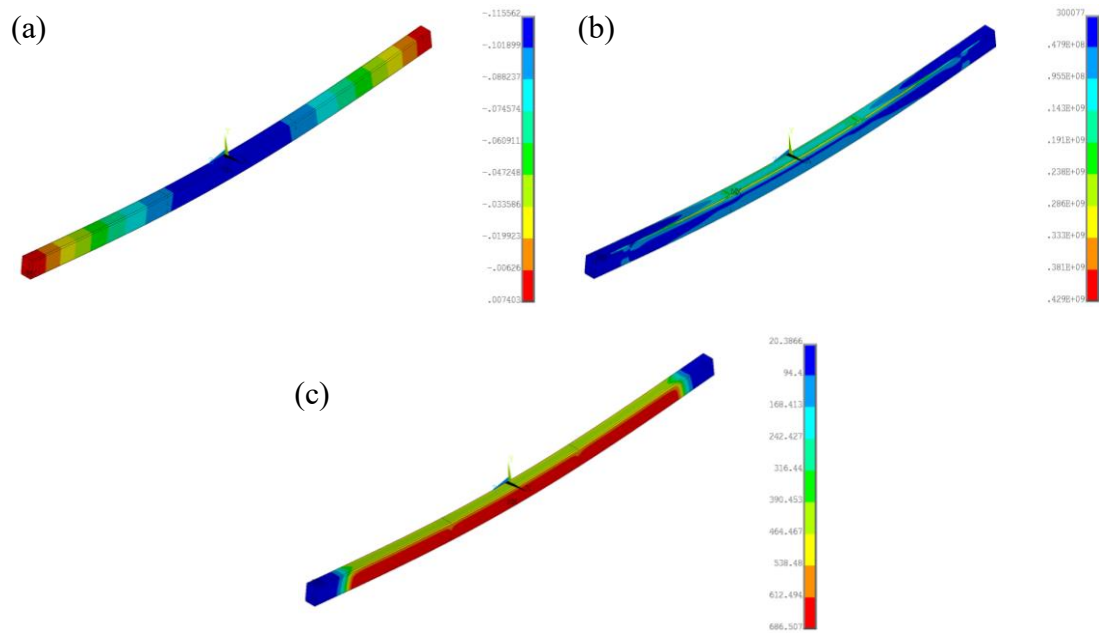
**Figura B.85 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



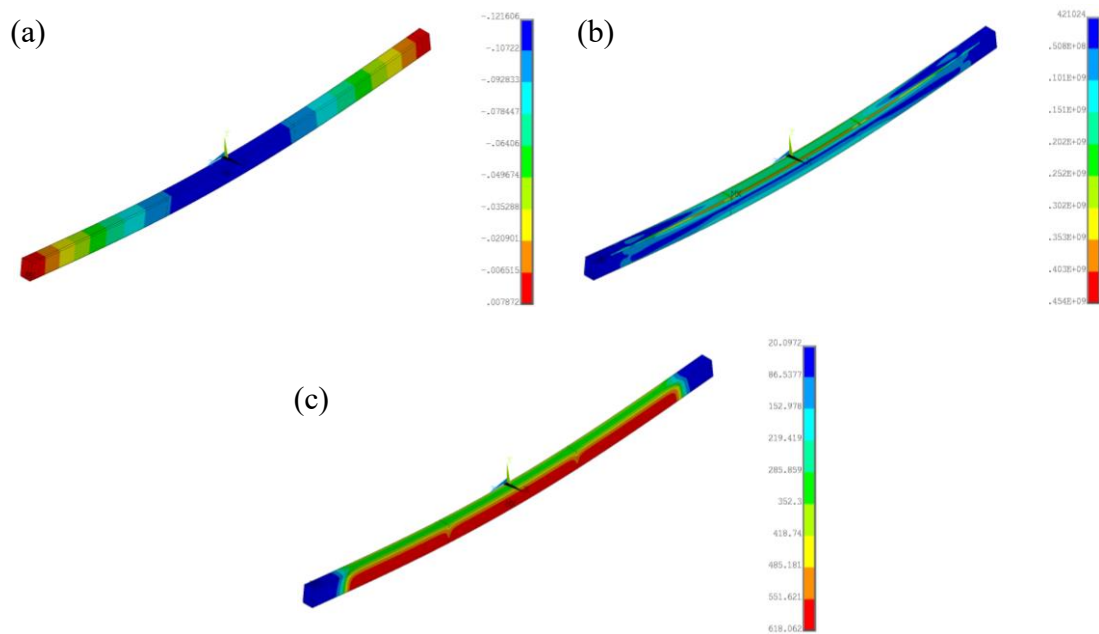
**Figura B.86 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



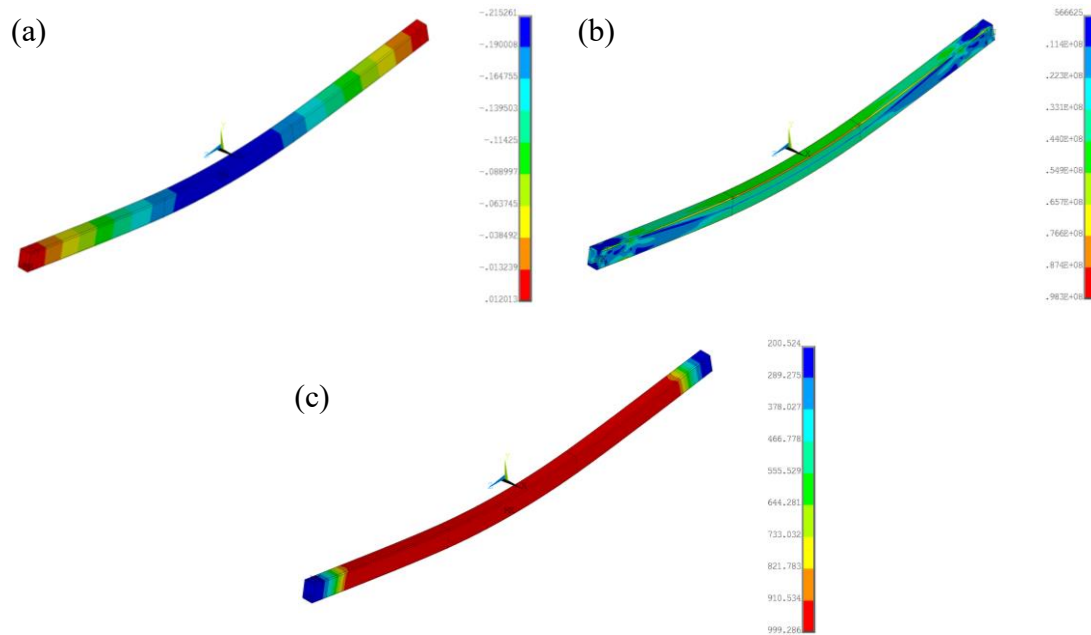
**Figura B.87 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



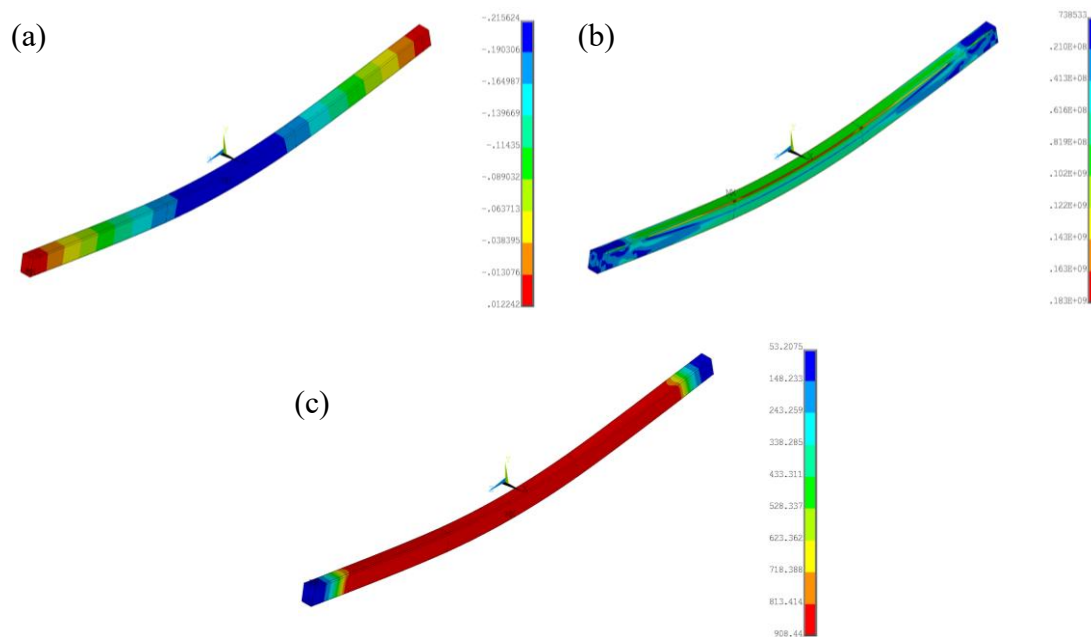
**Figura B.88 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



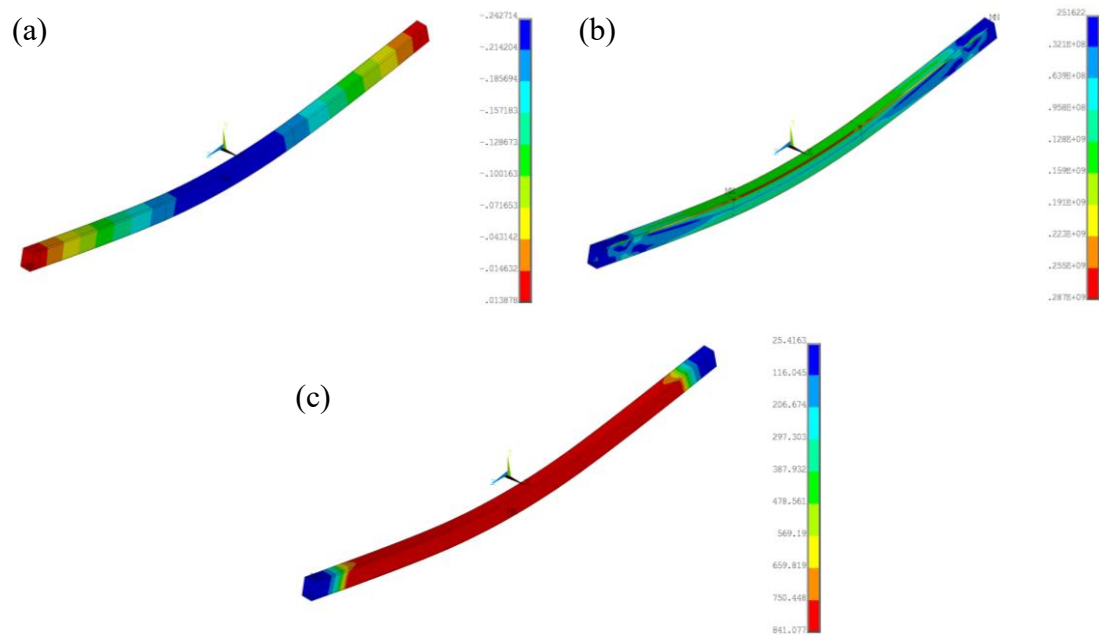
**Figura B.89 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



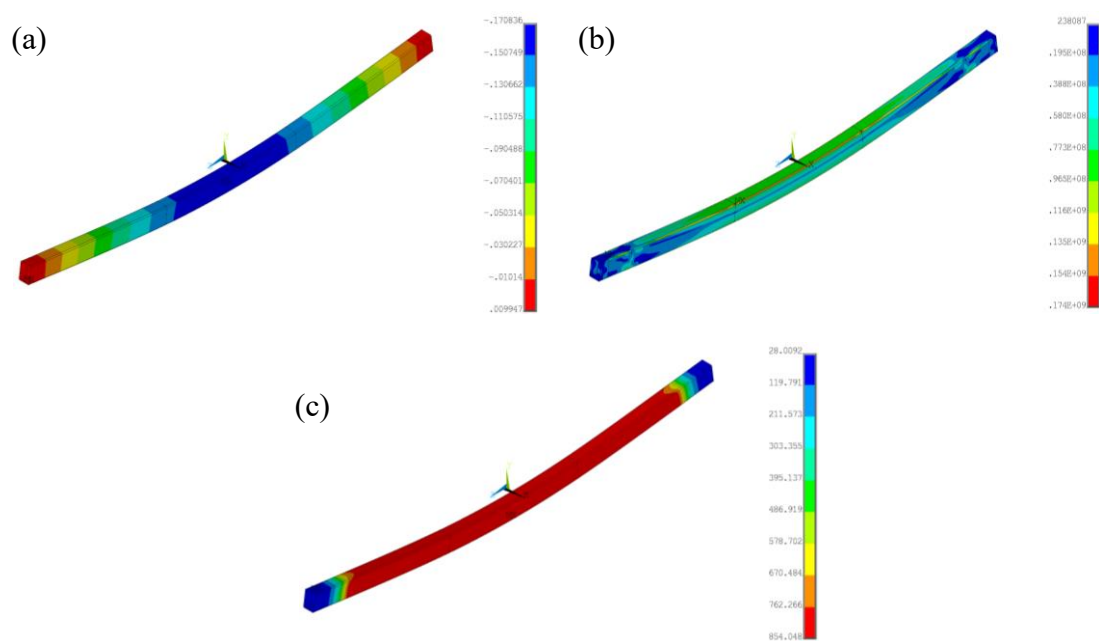
**Figura B.90 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.91 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.92 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.93 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**

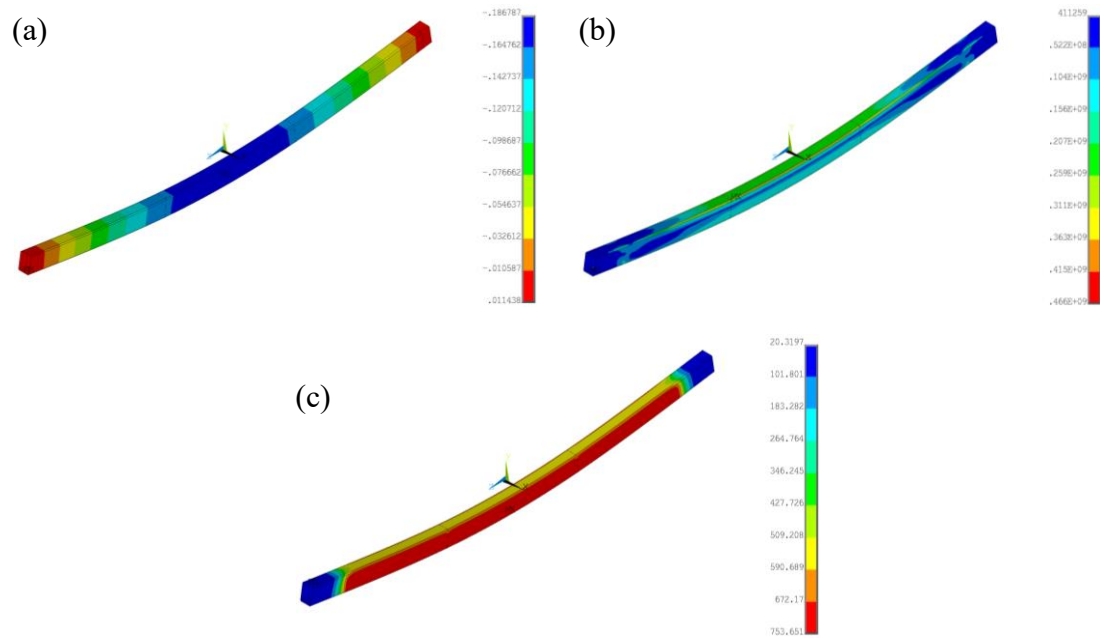


Figura B.94 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

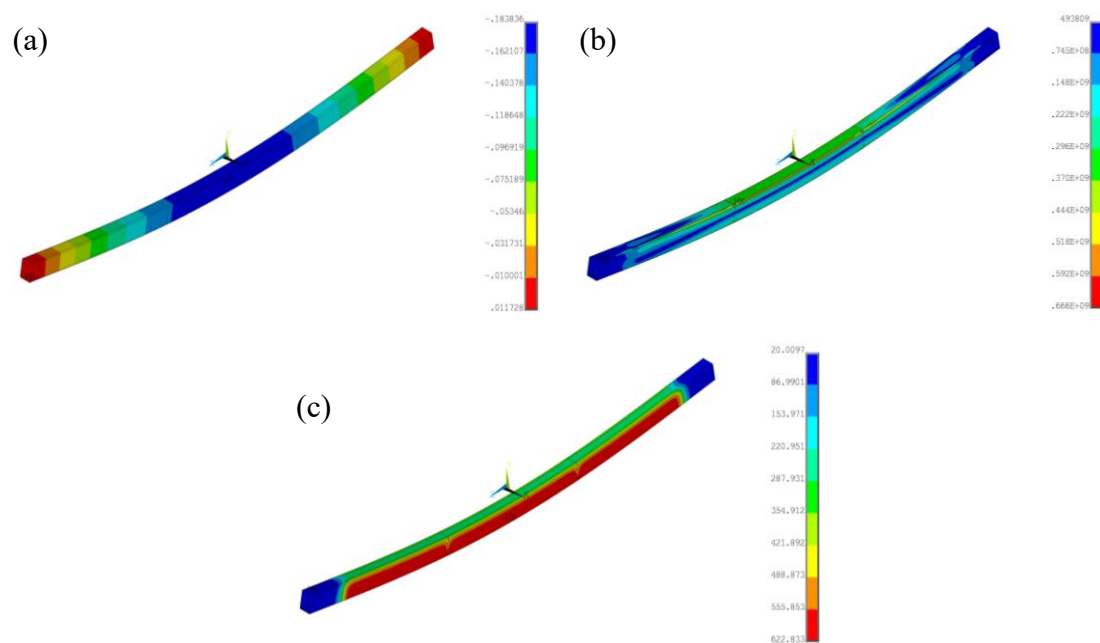
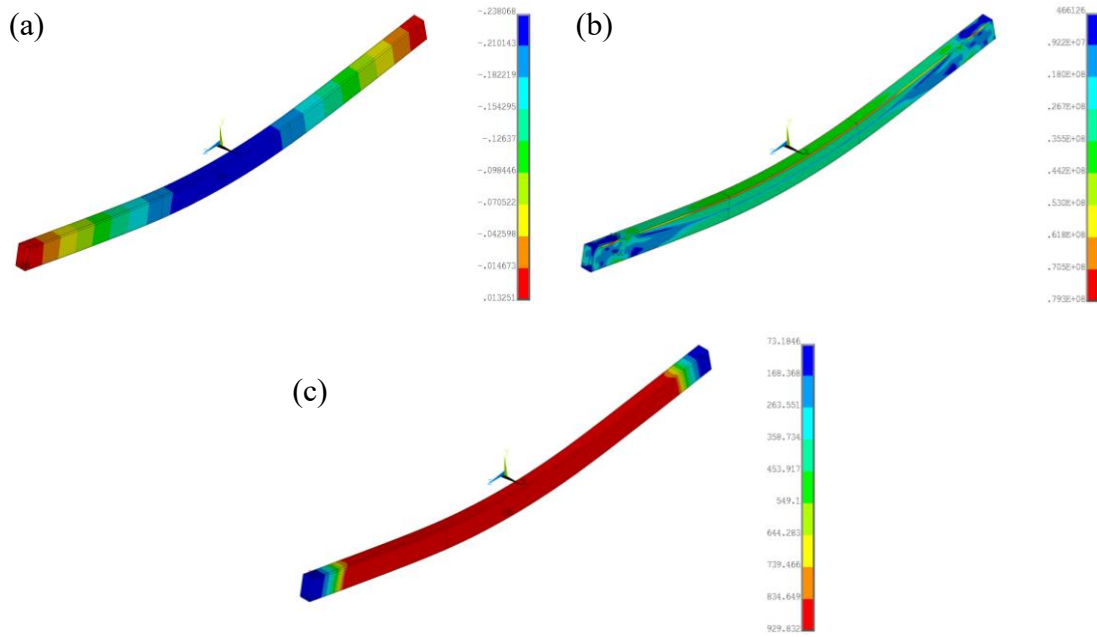
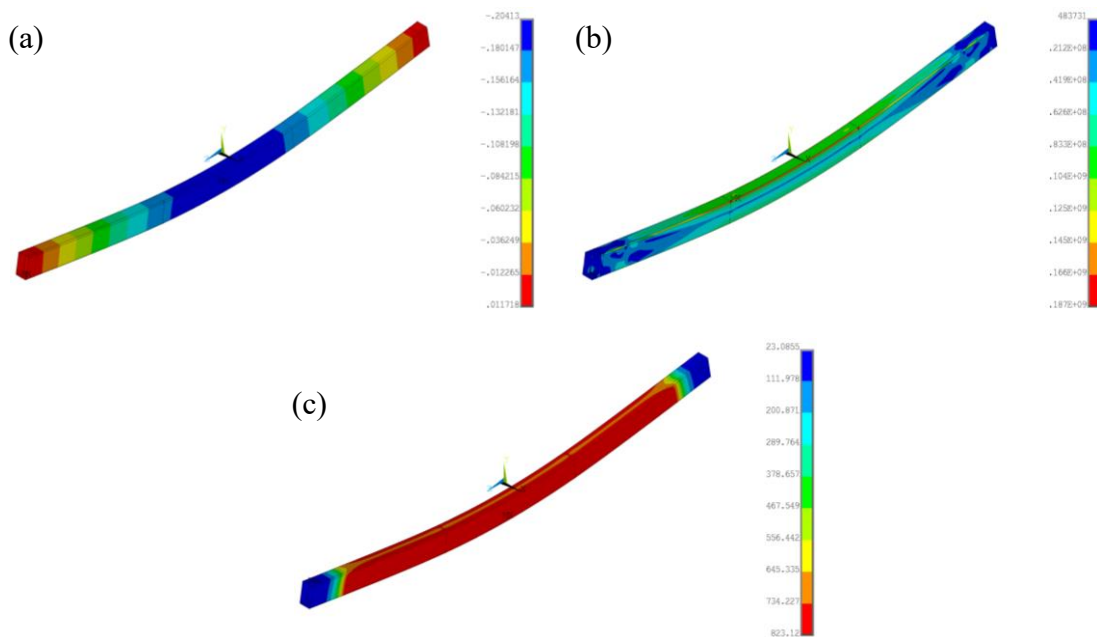


Figura B.95 – Amostra RHS150x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.



**Figura B.96 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.97 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**

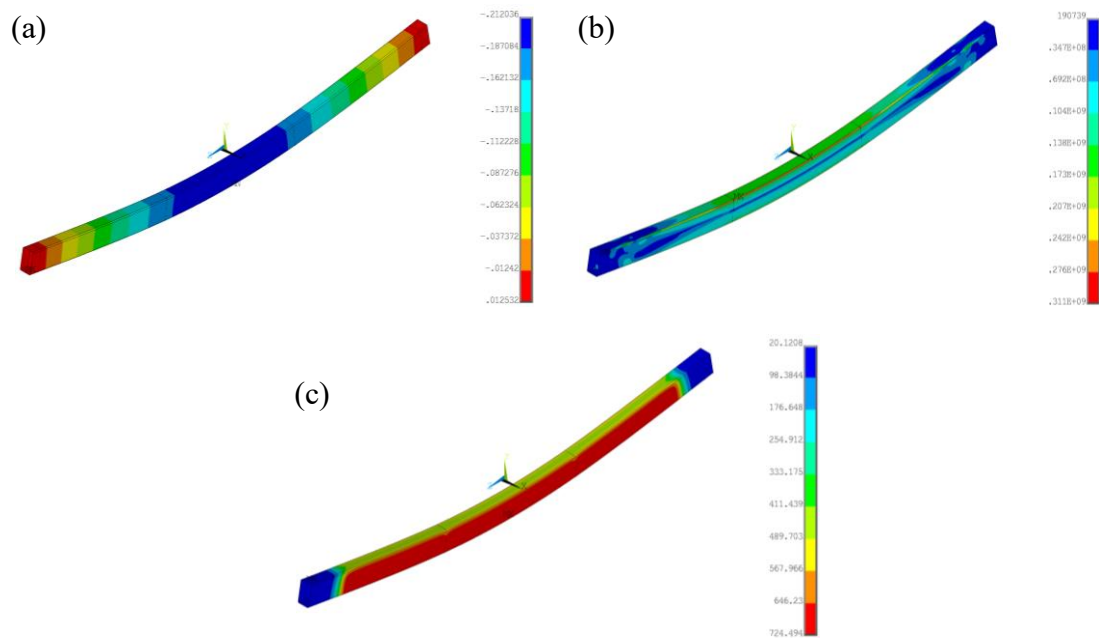


Figura B.98 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.

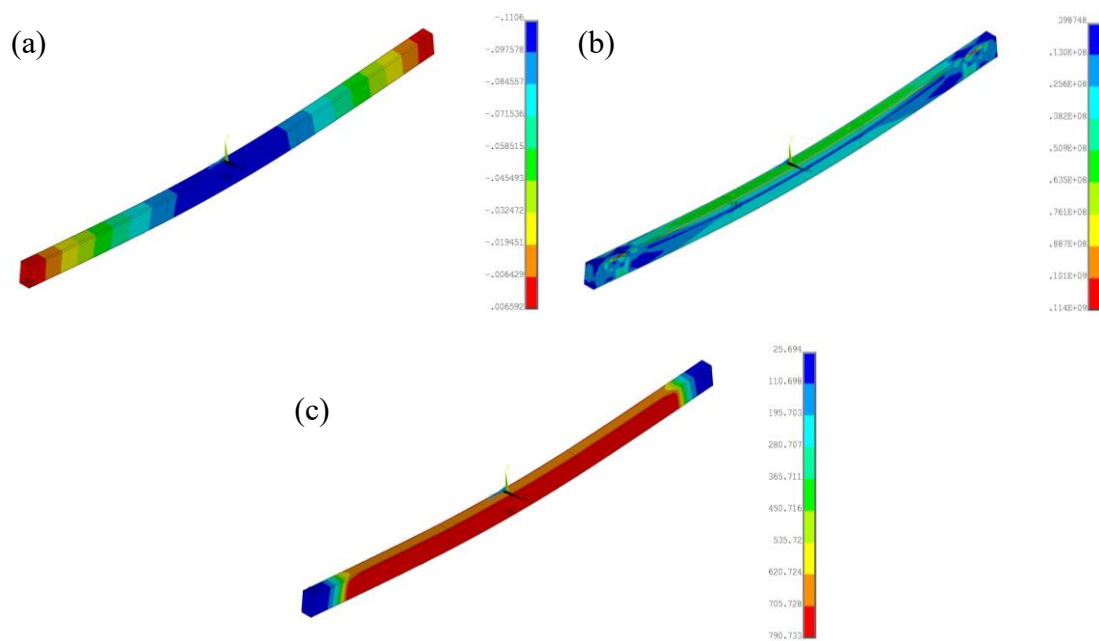
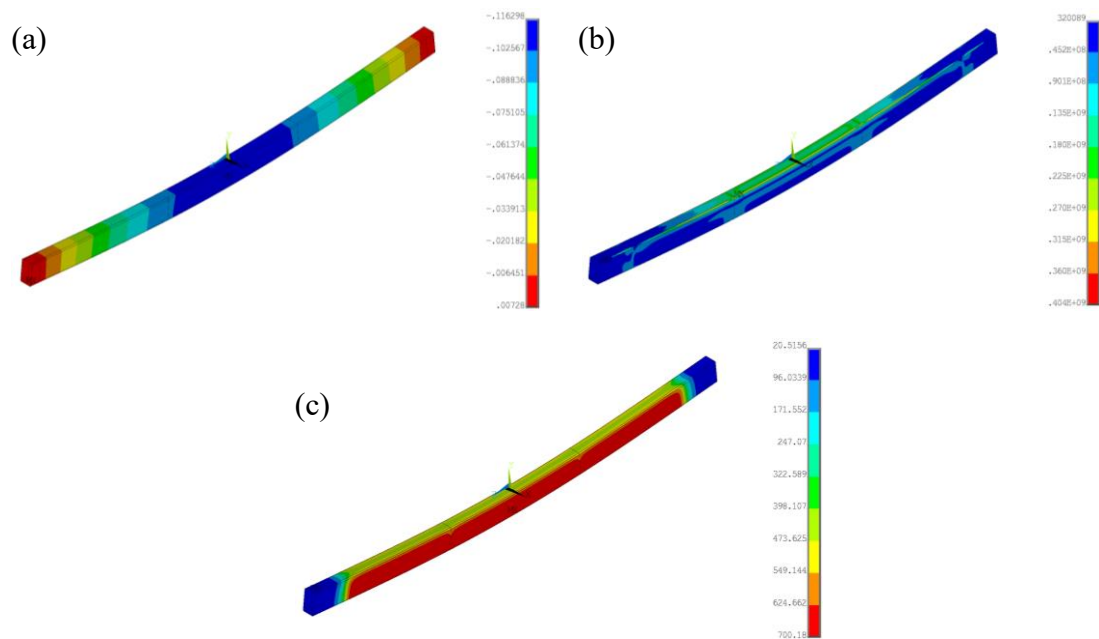
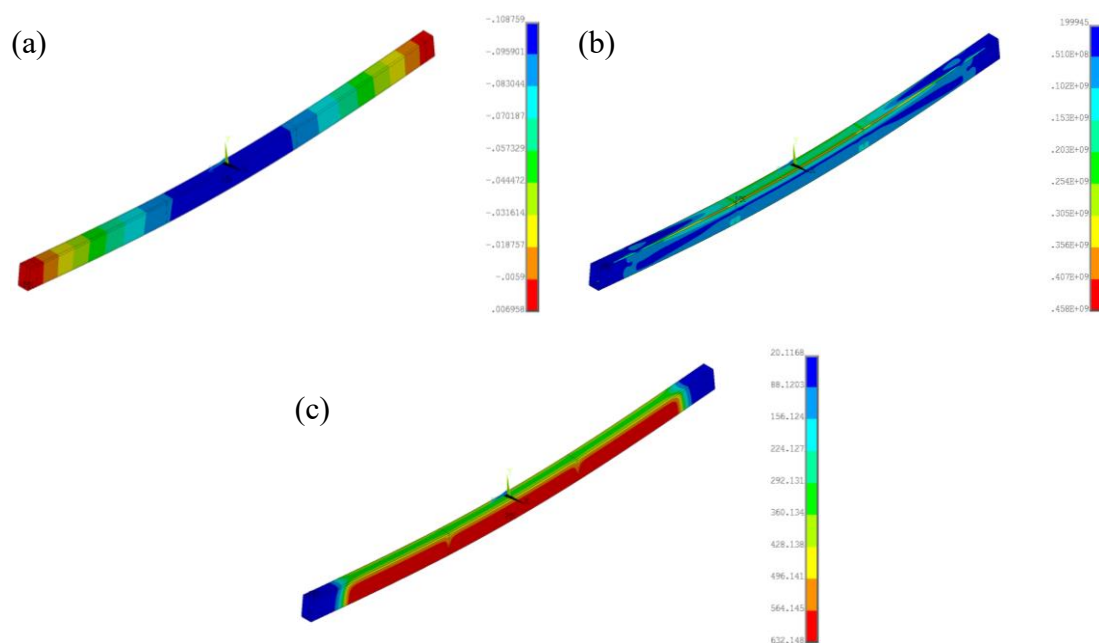


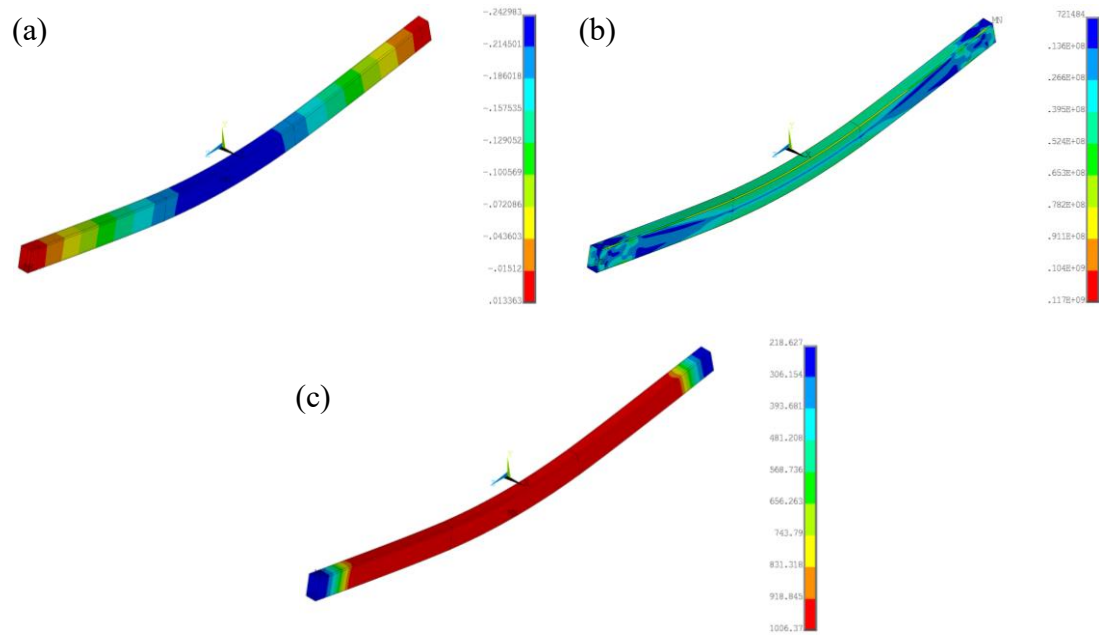
Figura B.99 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.



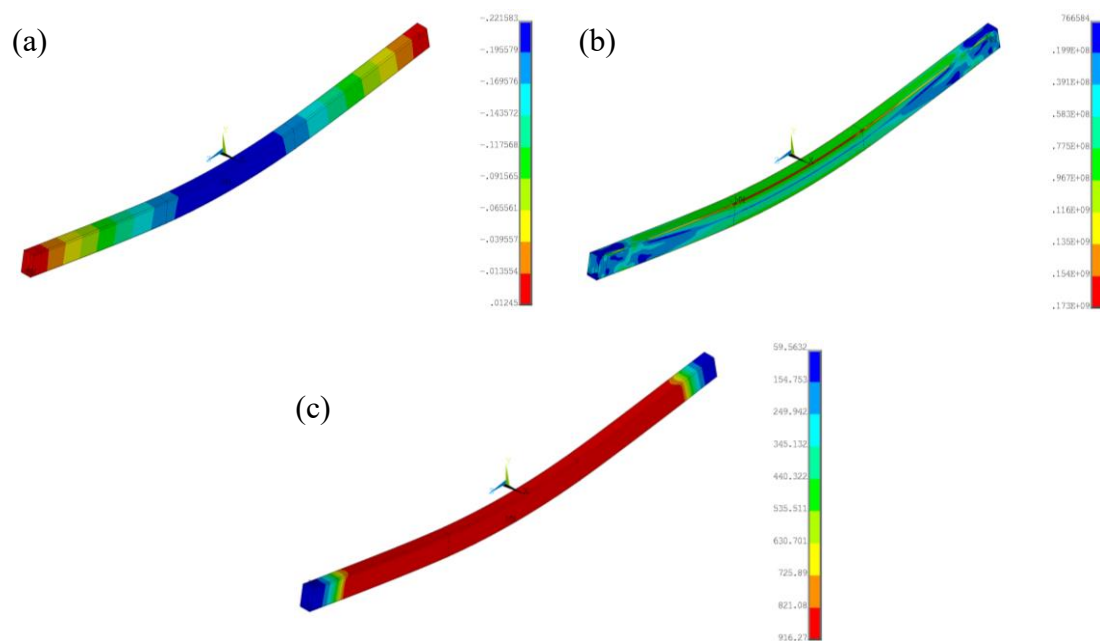
**Figura B.100 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



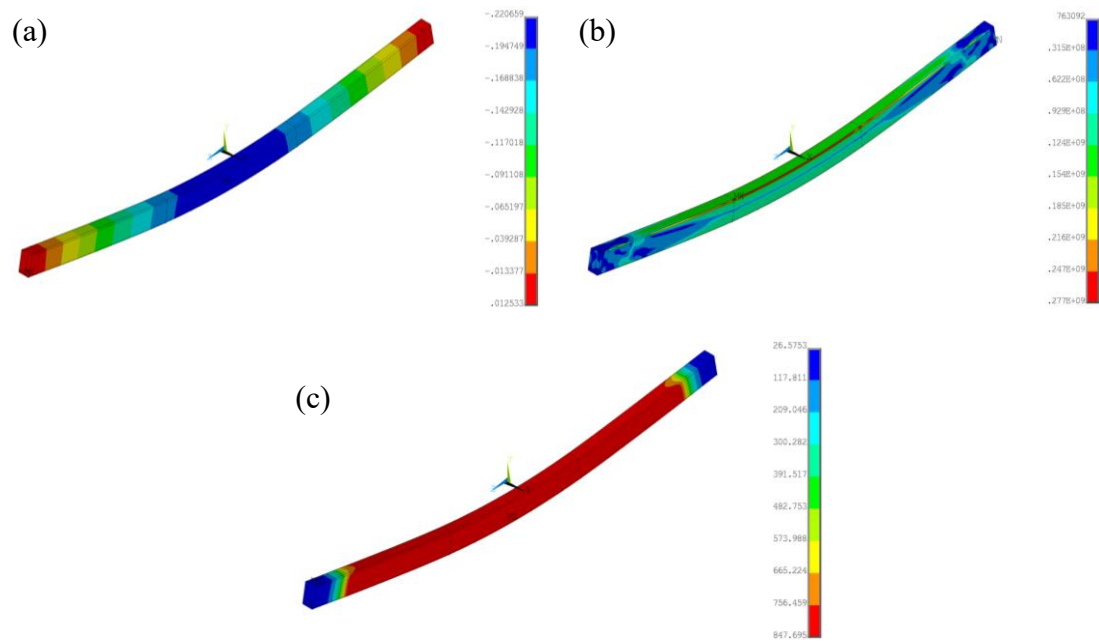
**Figura B.101 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



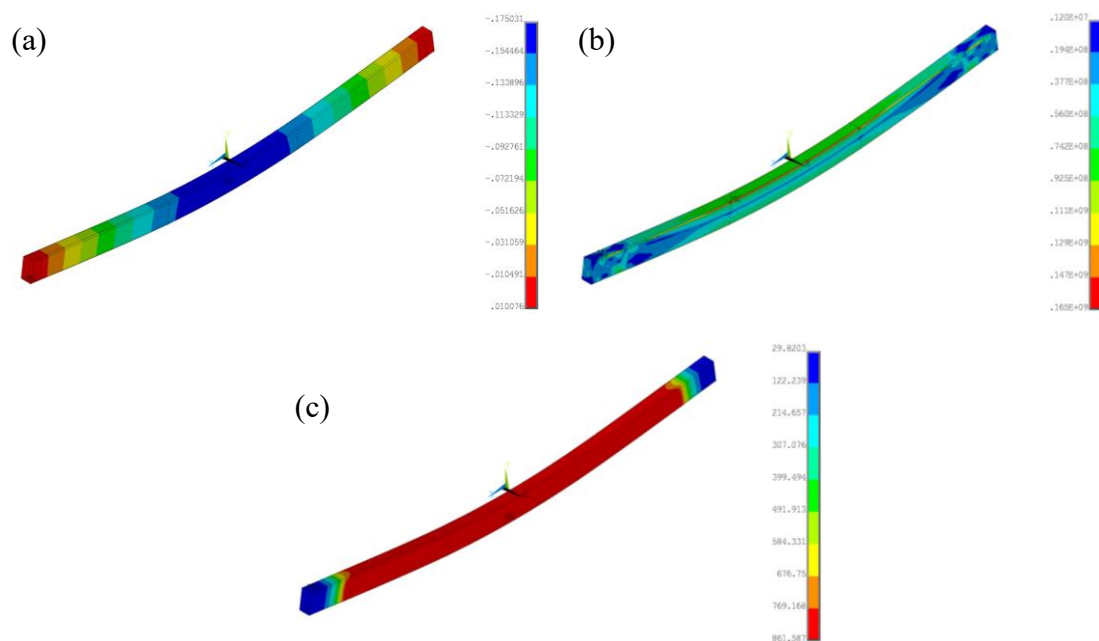
**Figura B.102 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



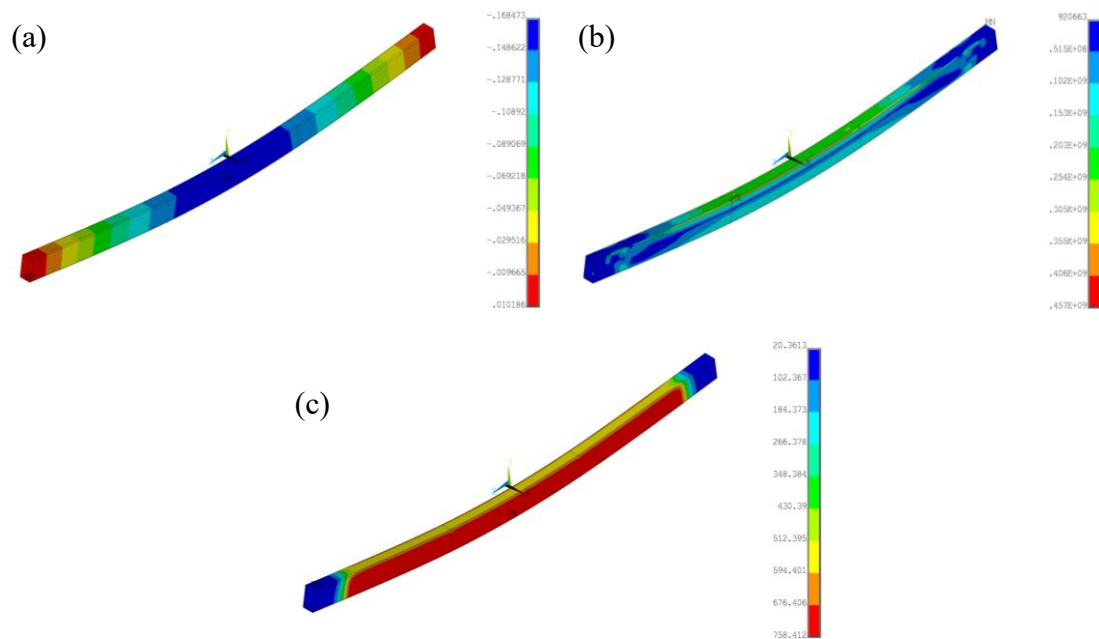
**Figura B.103 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



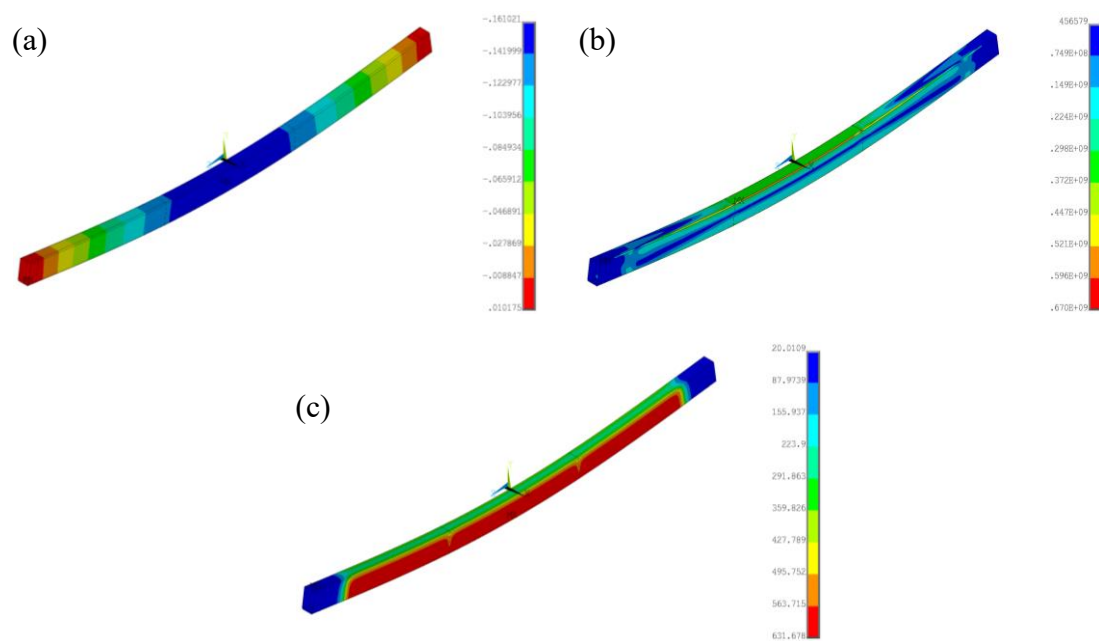
**Figura B.104 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



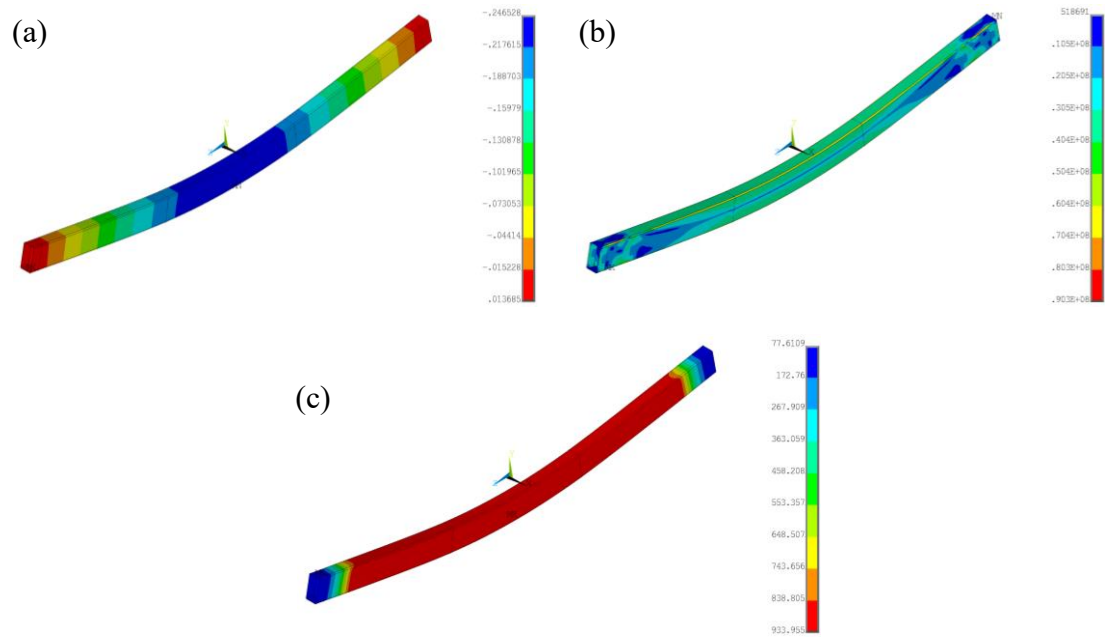
**Figura B.105 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



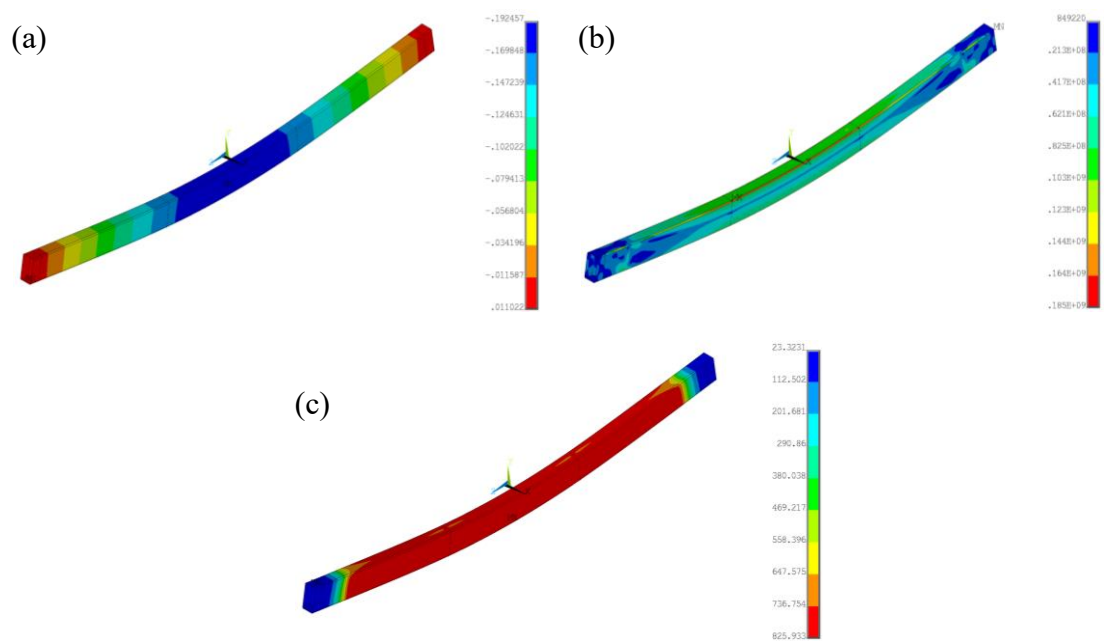
**Figura B.106 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



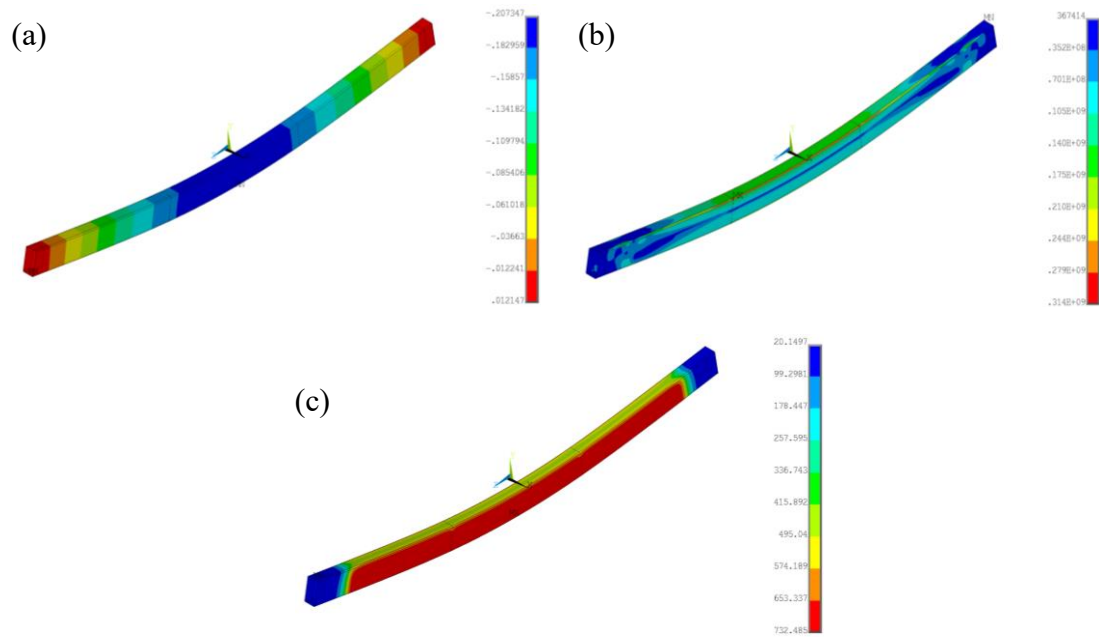
**Figura B.107 – Amostra RHS180x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



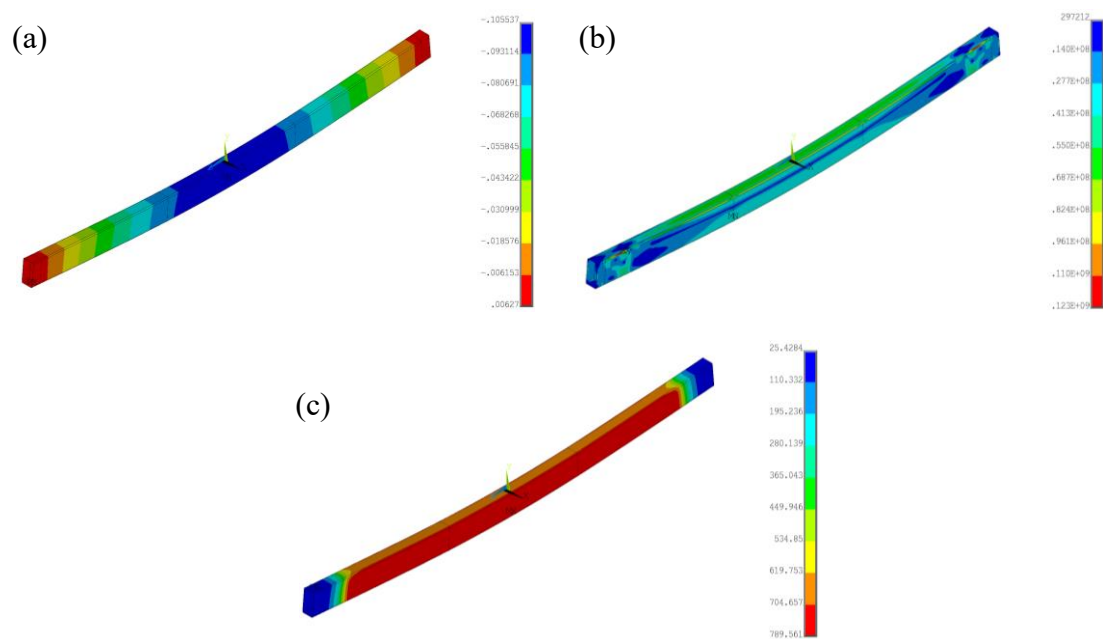
**Figura B.108 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



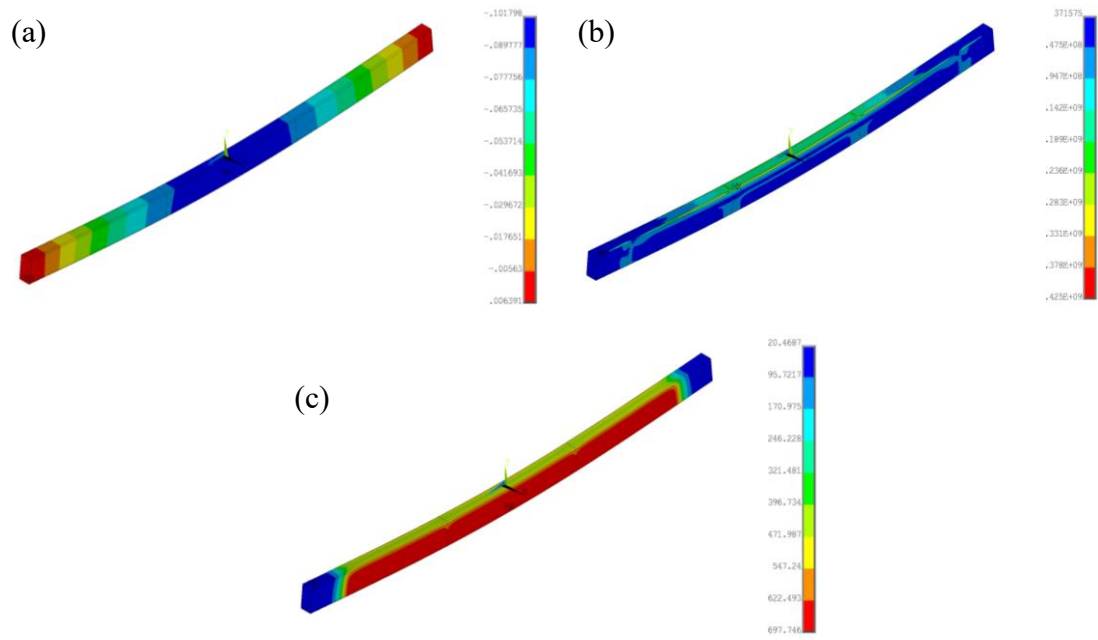
**Figura B.109 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



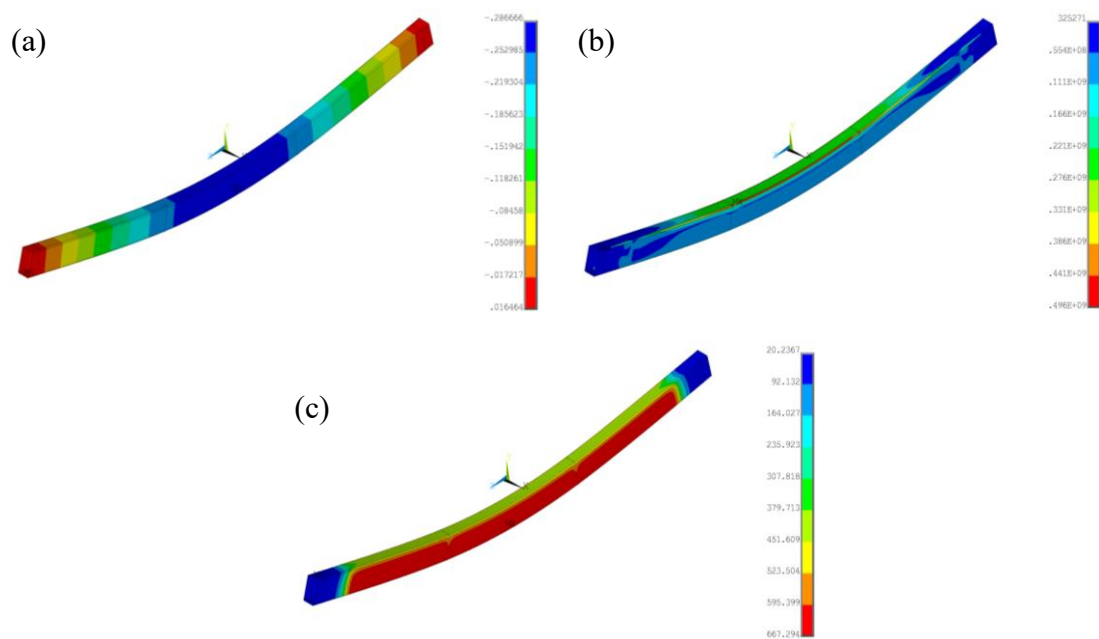
**Figura B.110 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



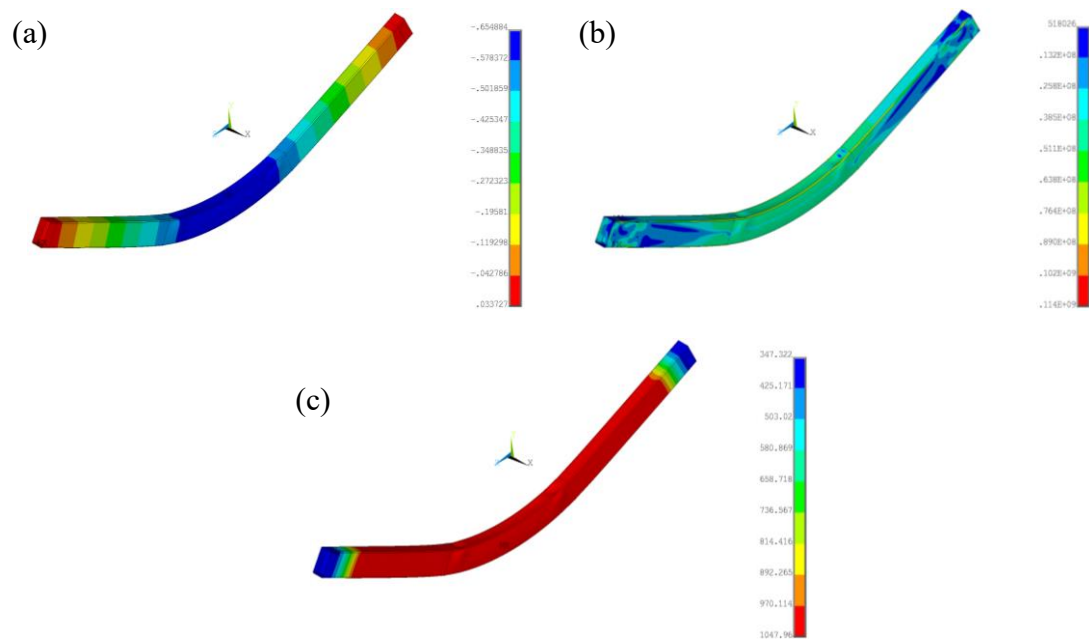
**Figura B.111 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



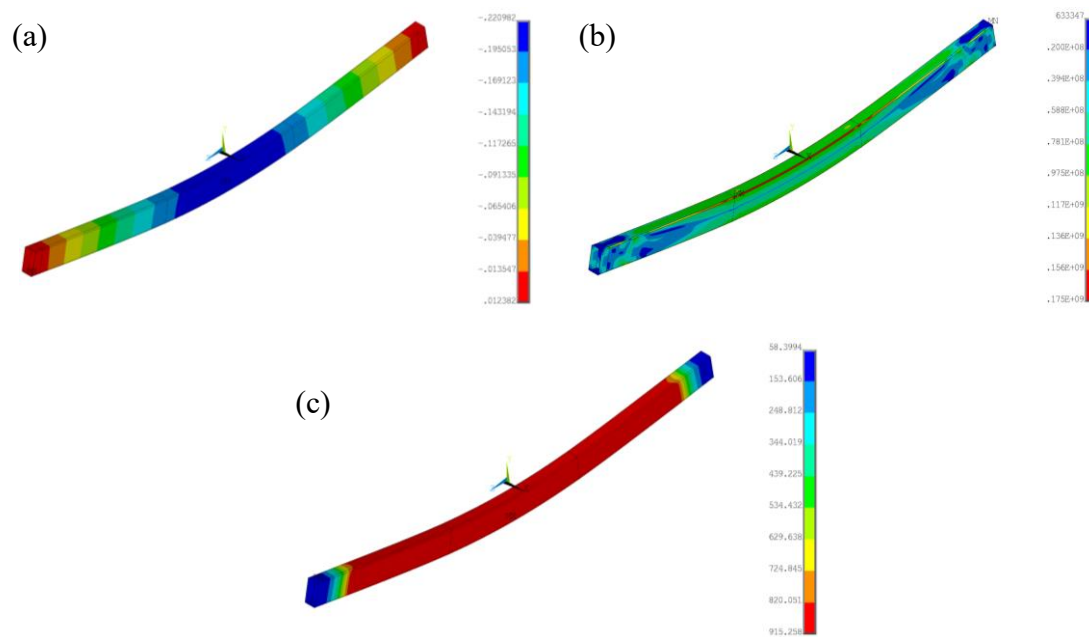
**Figura B.112 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



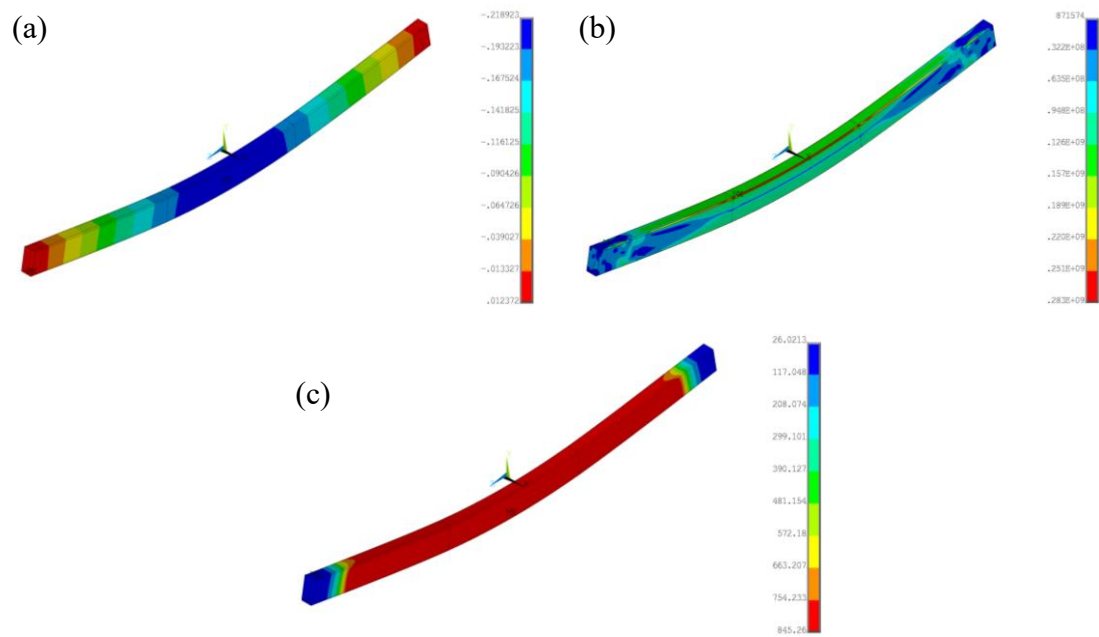
**Figura B.113 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



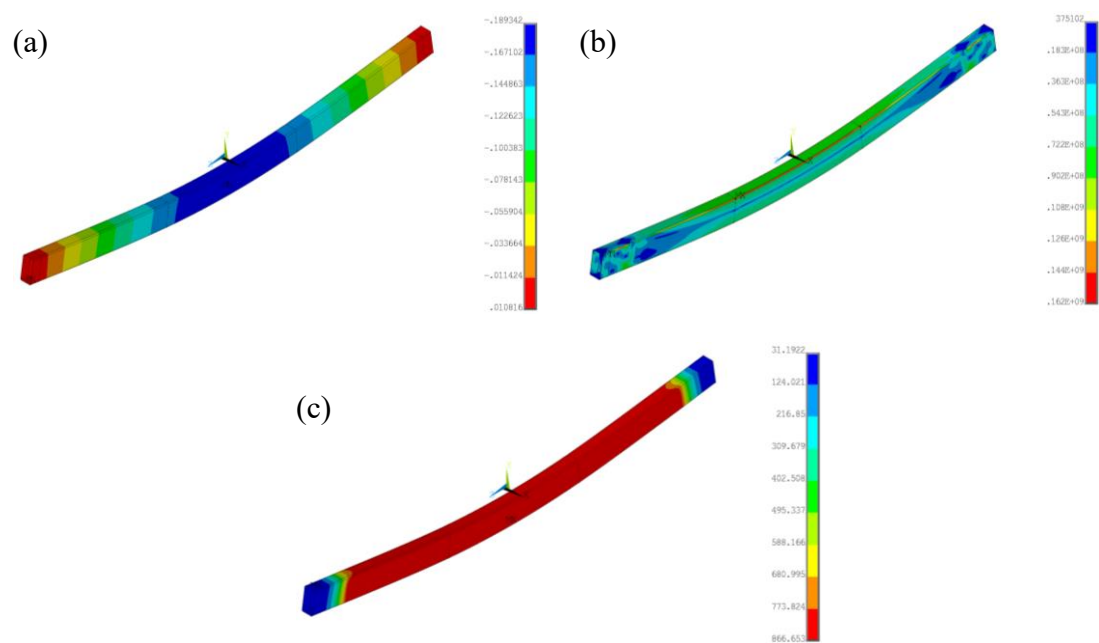
**Figura B.114 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



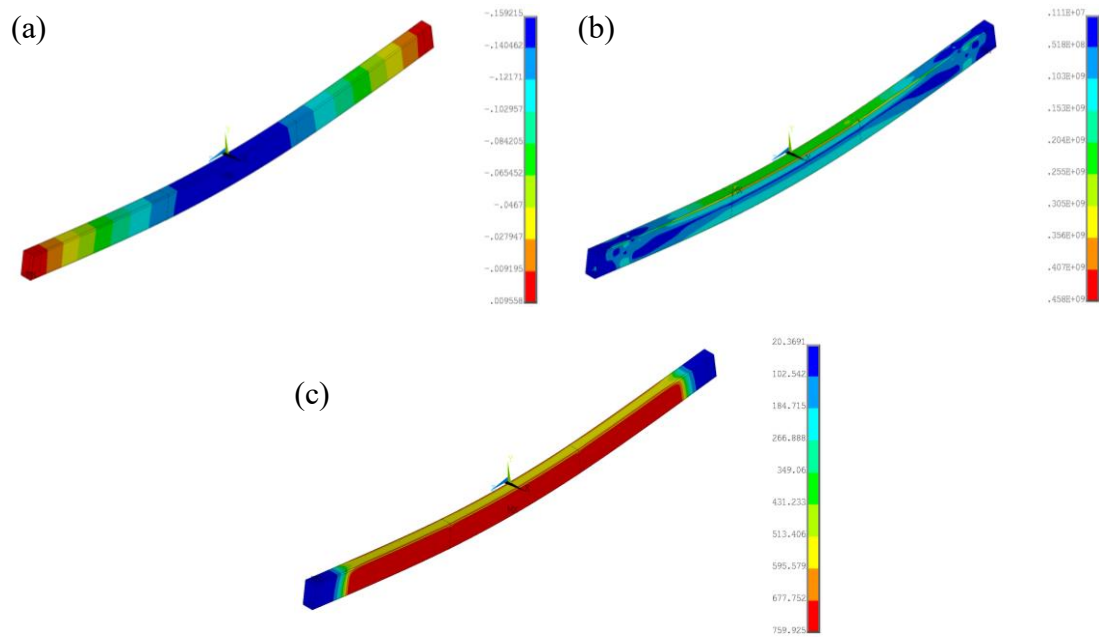
**Figura B.115 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



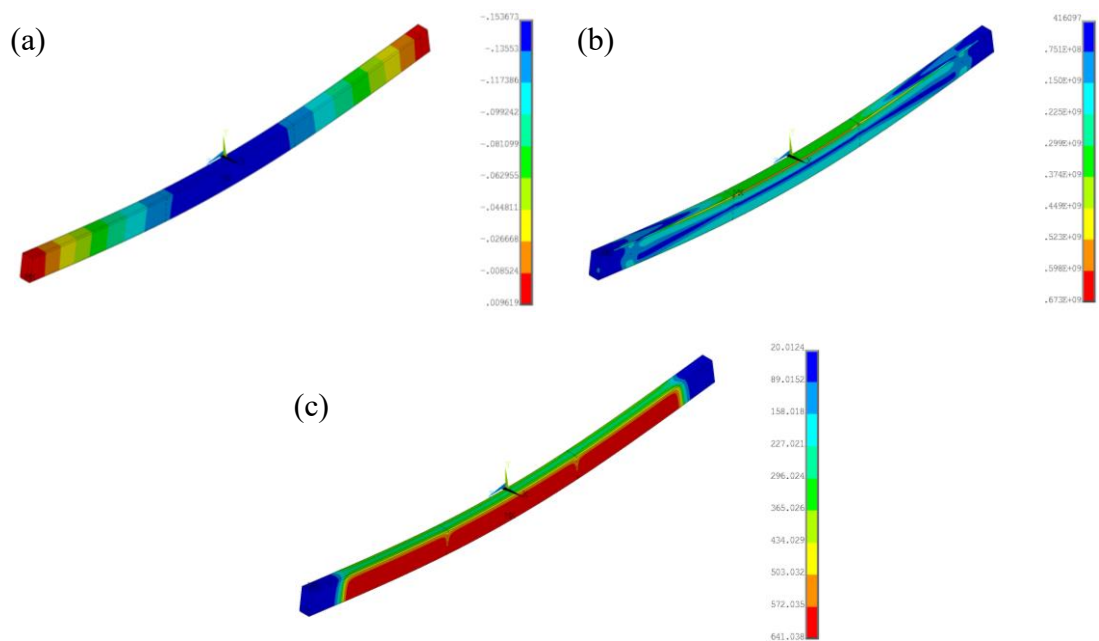
**Figura B.116 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



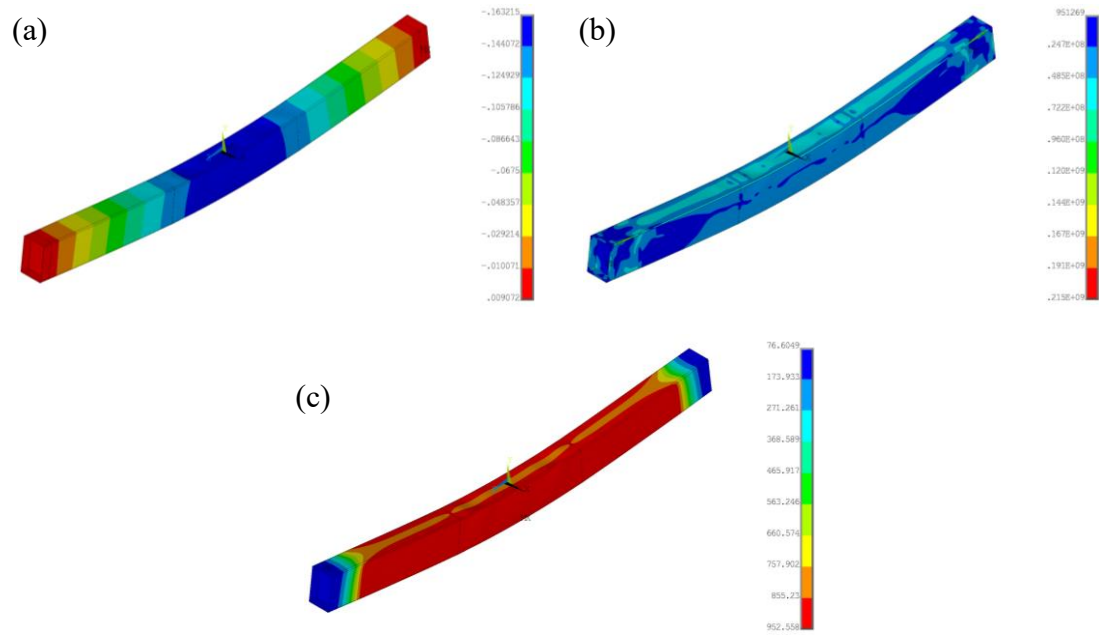
**Figura B.117 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



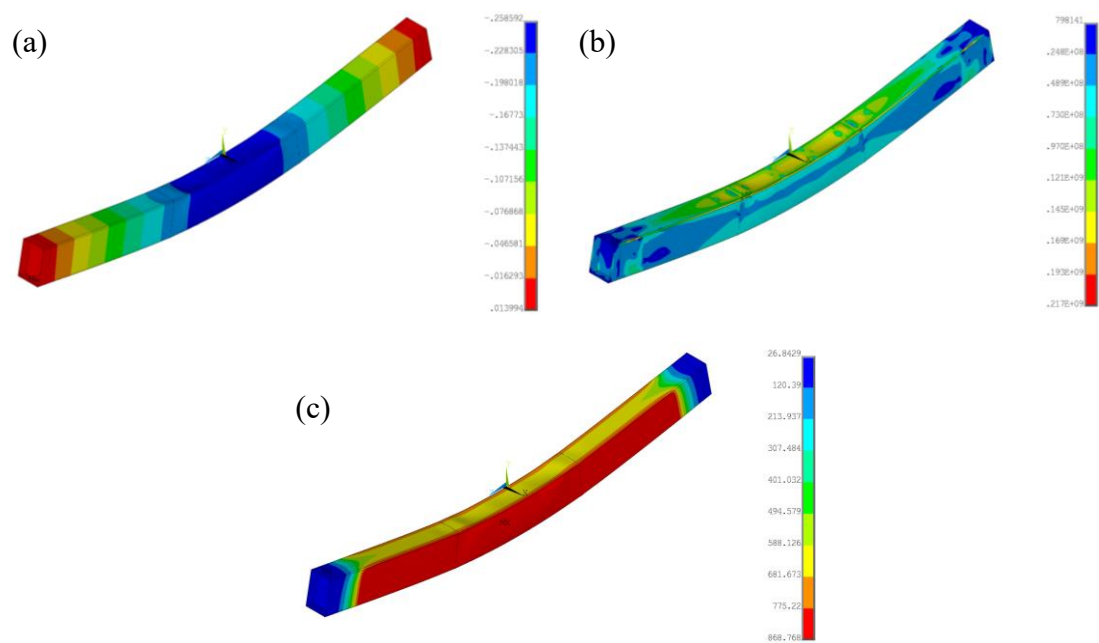
**Figura B.118 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



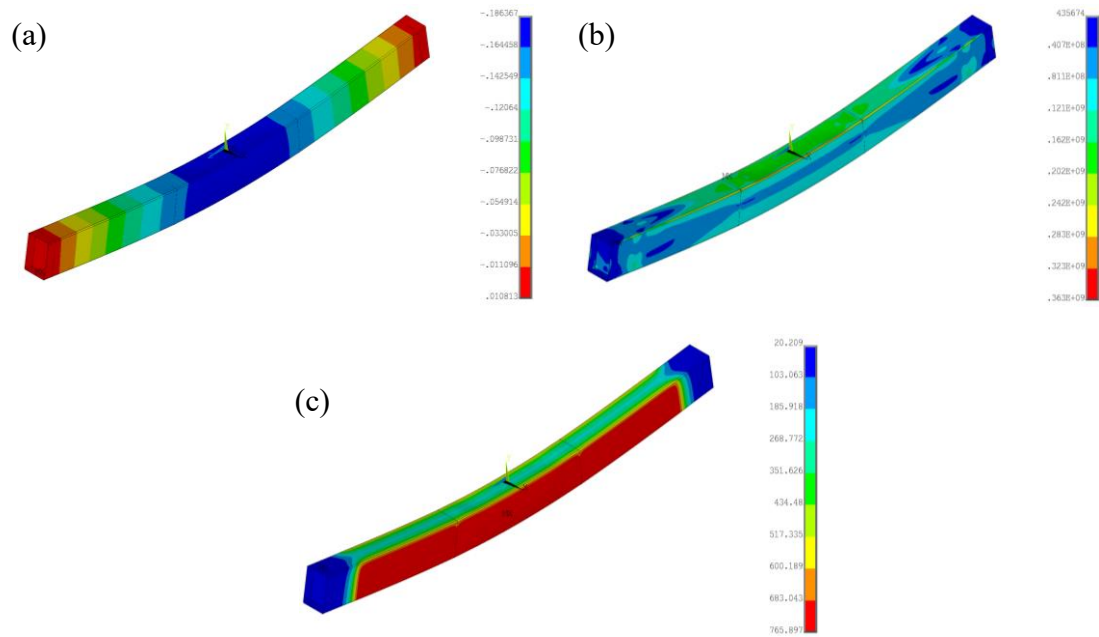
**Figura B.119 – Amostra RHS200x100x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



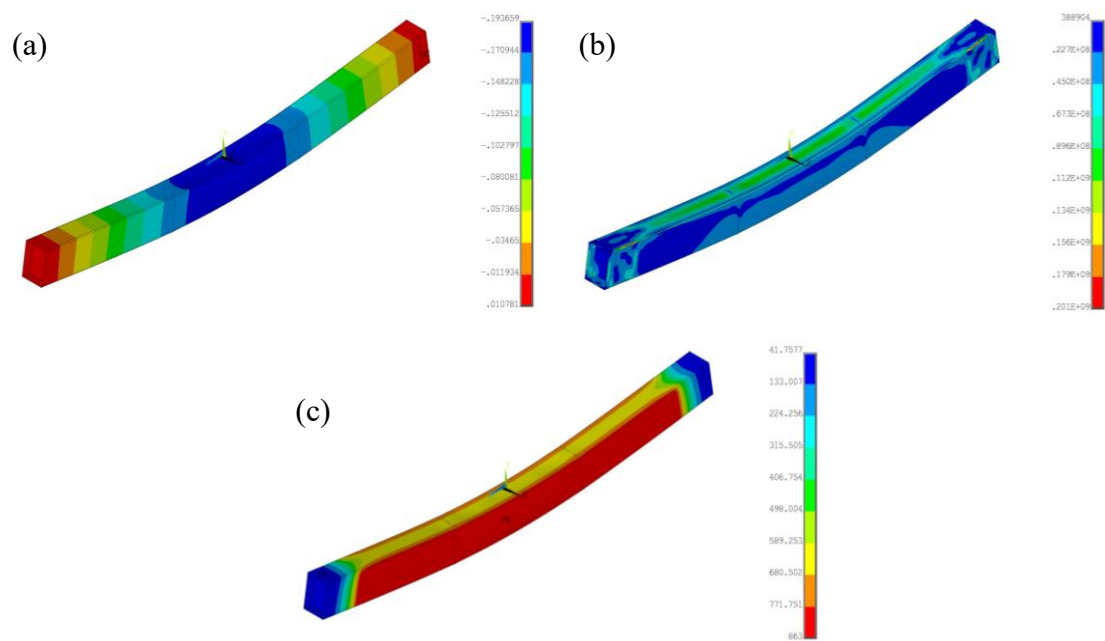
**Figura B.120 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



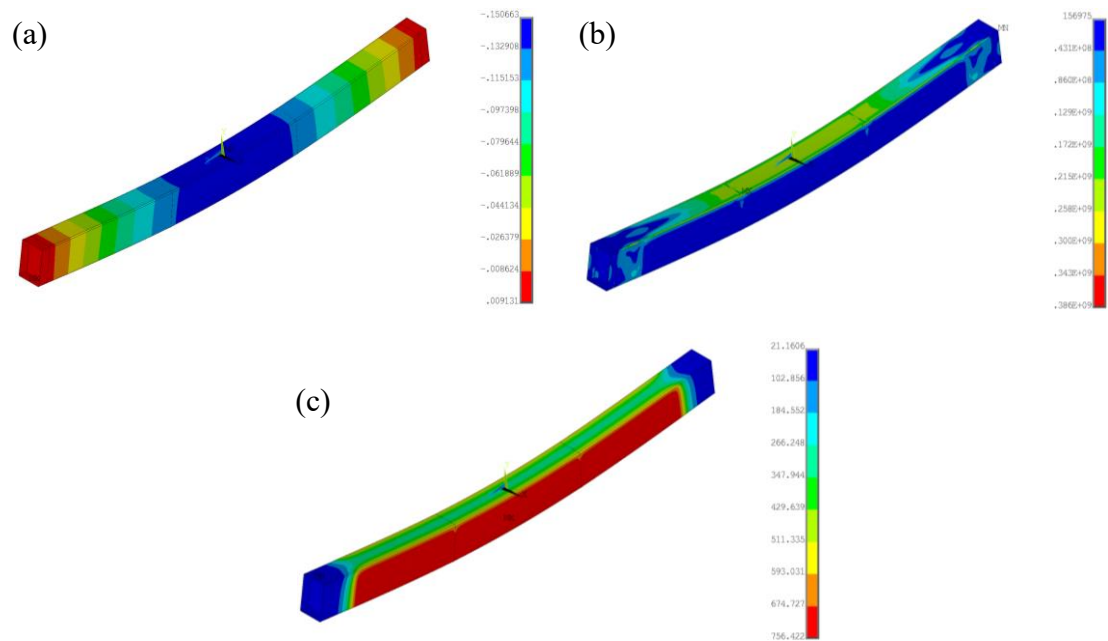
**Figura B.121 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



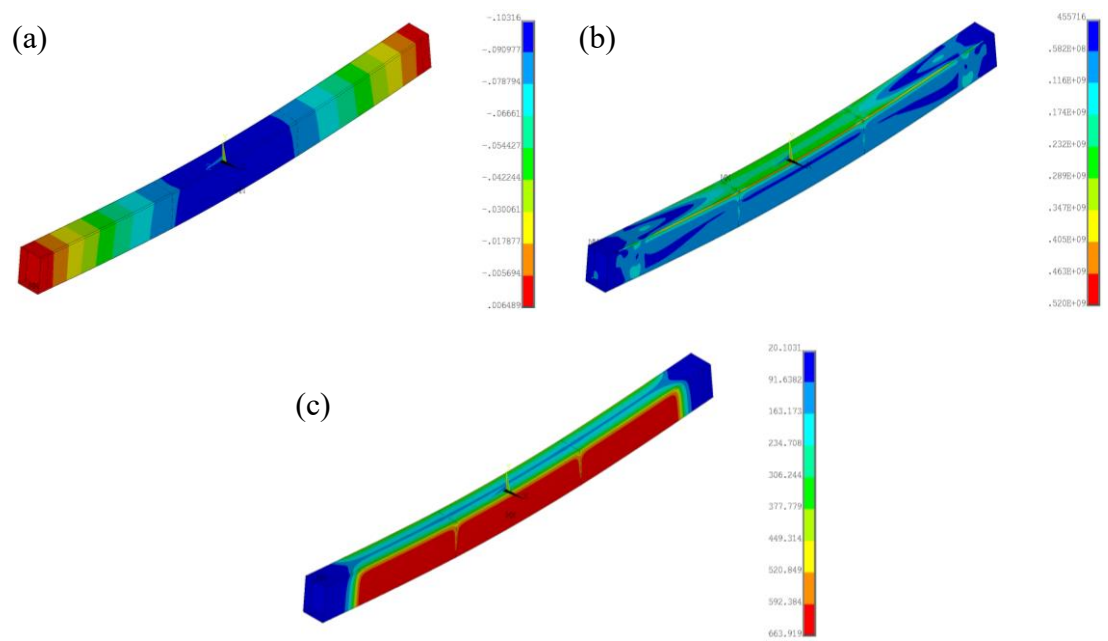
**Figura B.122 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



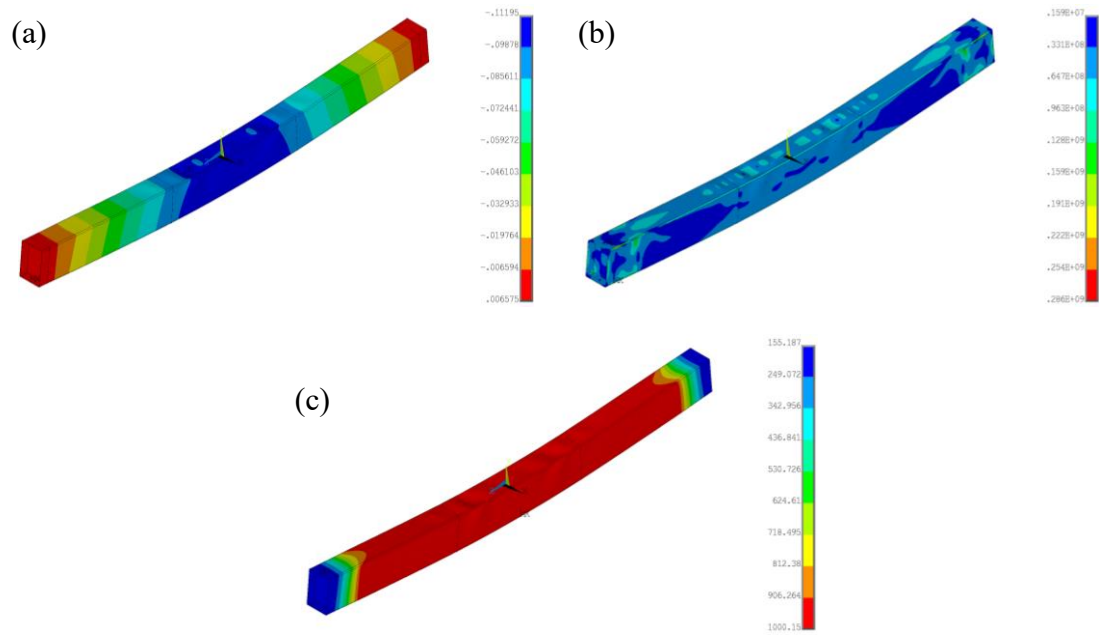
**Figura B.123 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



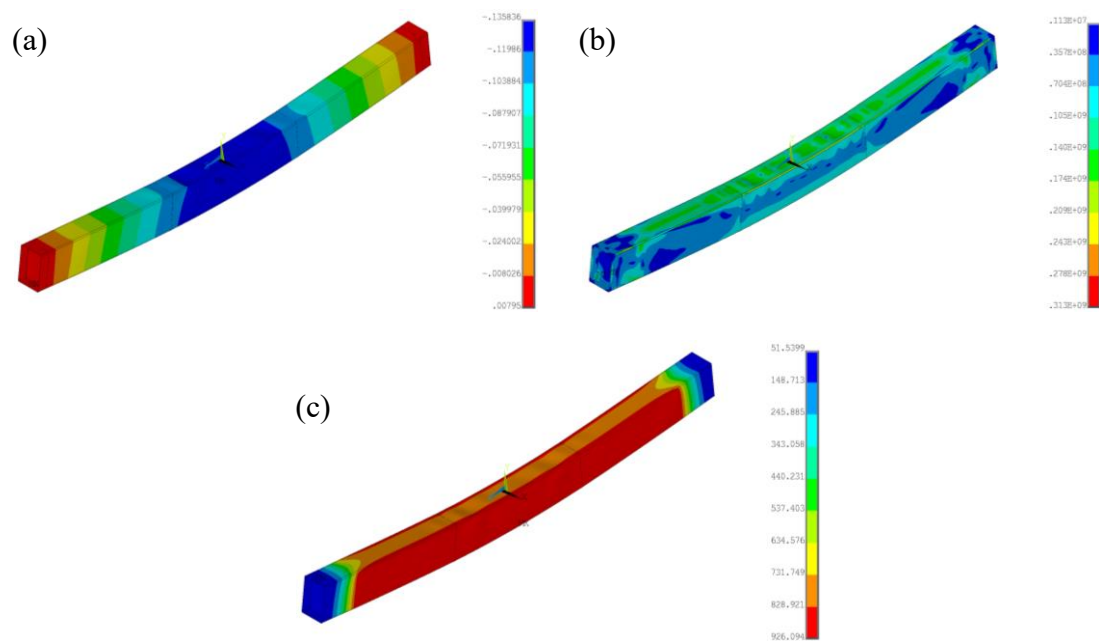
**Figura B.124 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



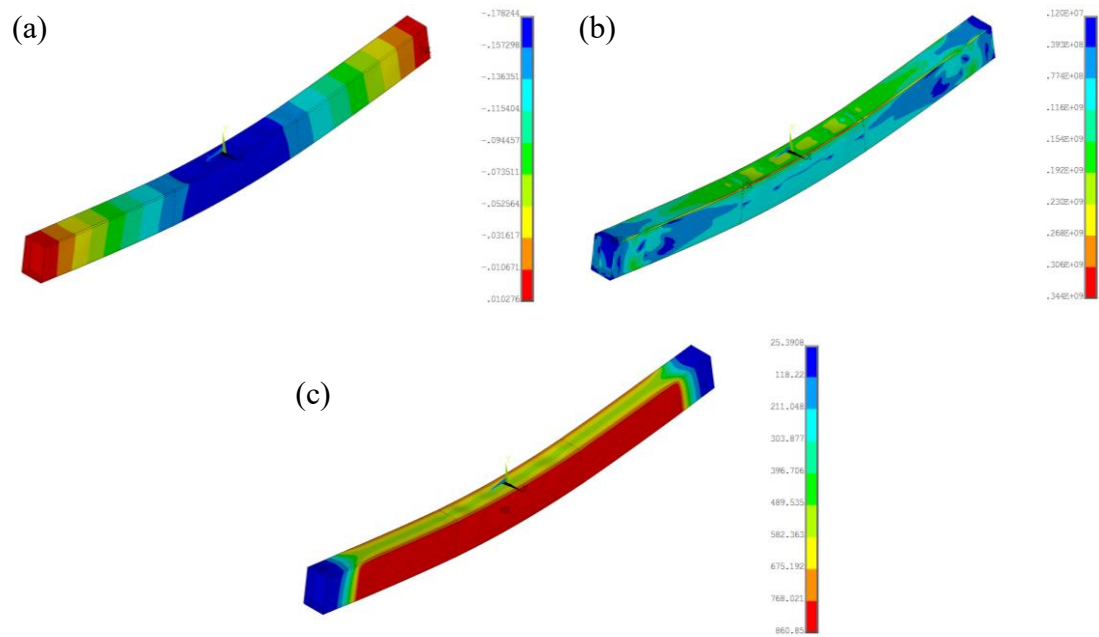
**Figura B.125 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



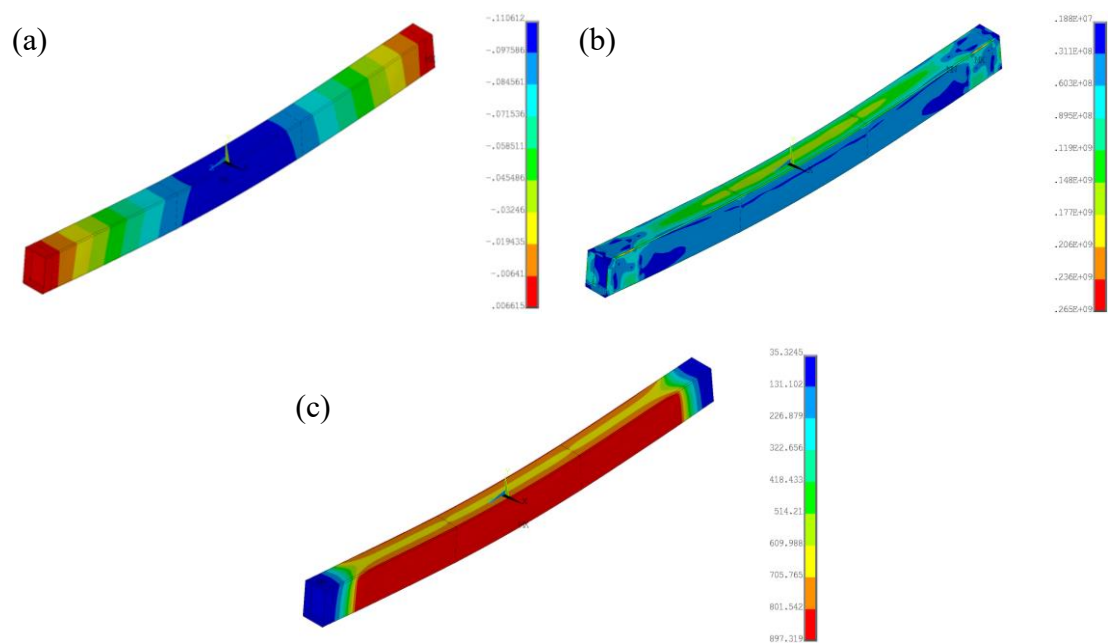
**Figura B.126 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



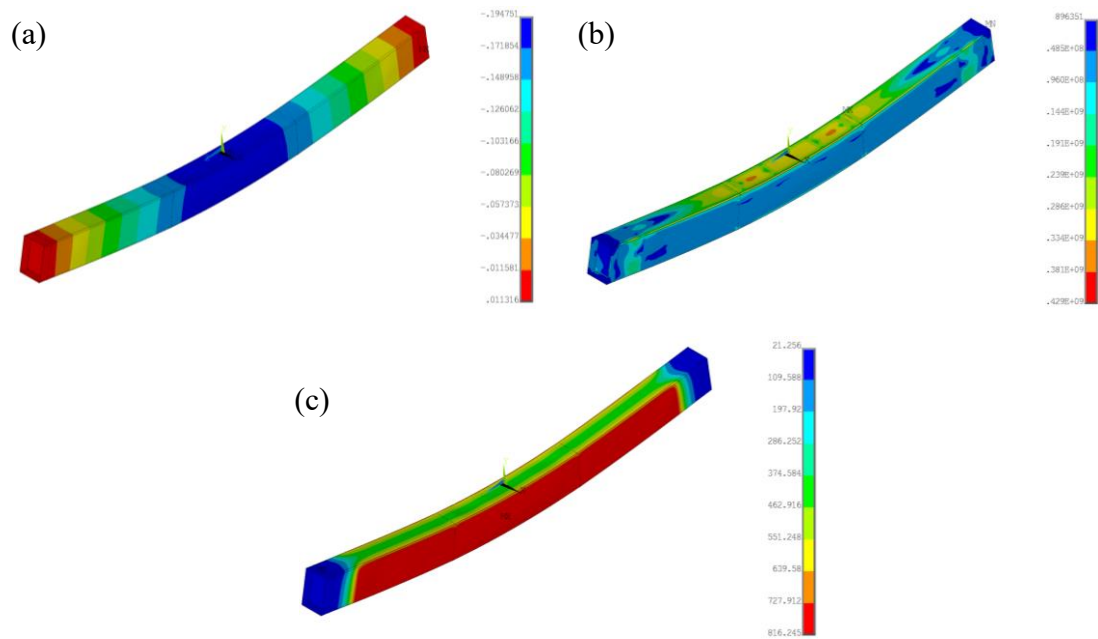
**Figura B.127 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



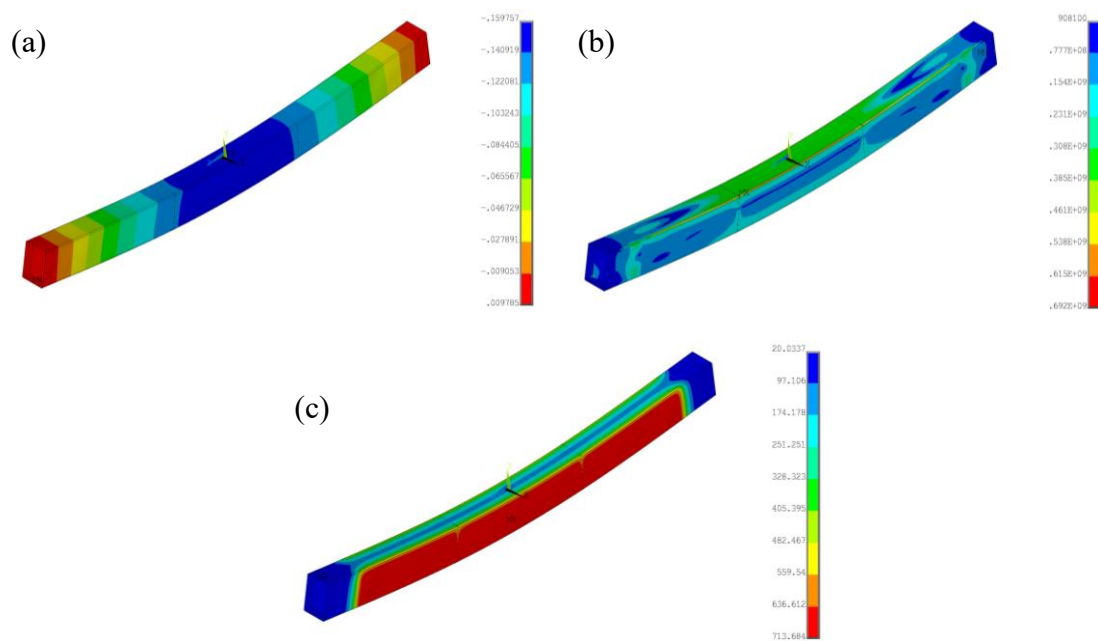
**Figura B.128 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



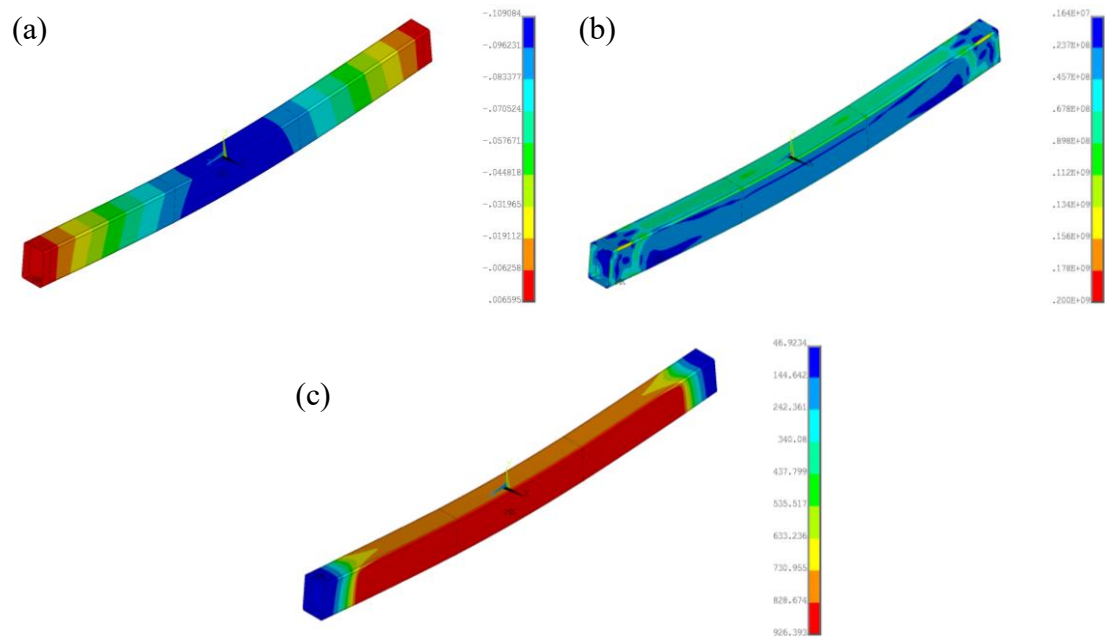
**Figura B.129 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



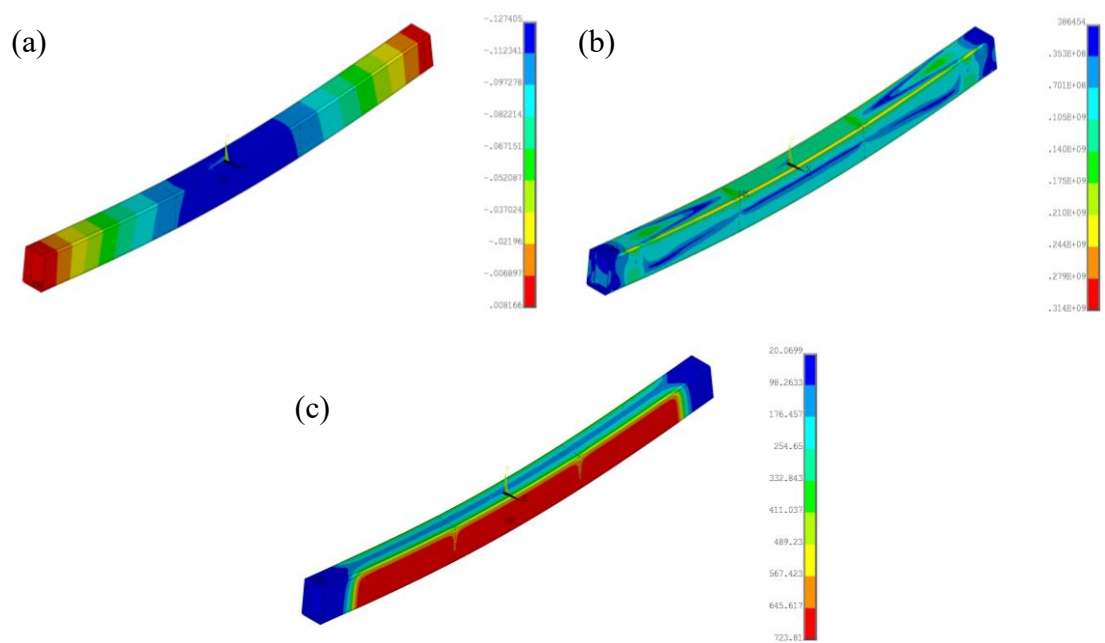
**Figura B.130 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



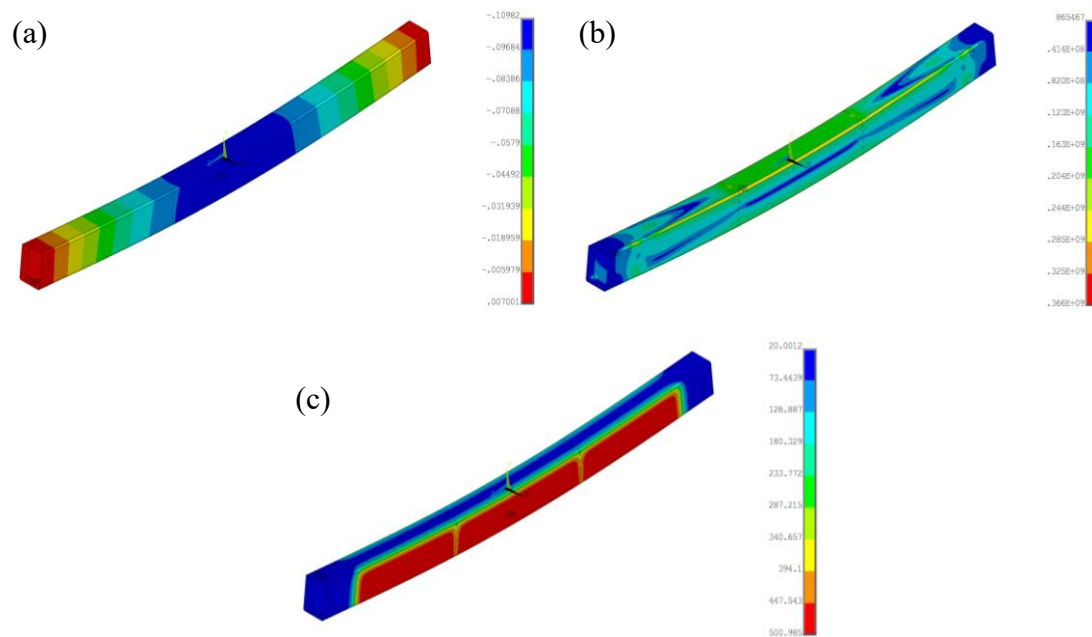
**Figura B.131 – Amostra RHS300x200x5 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



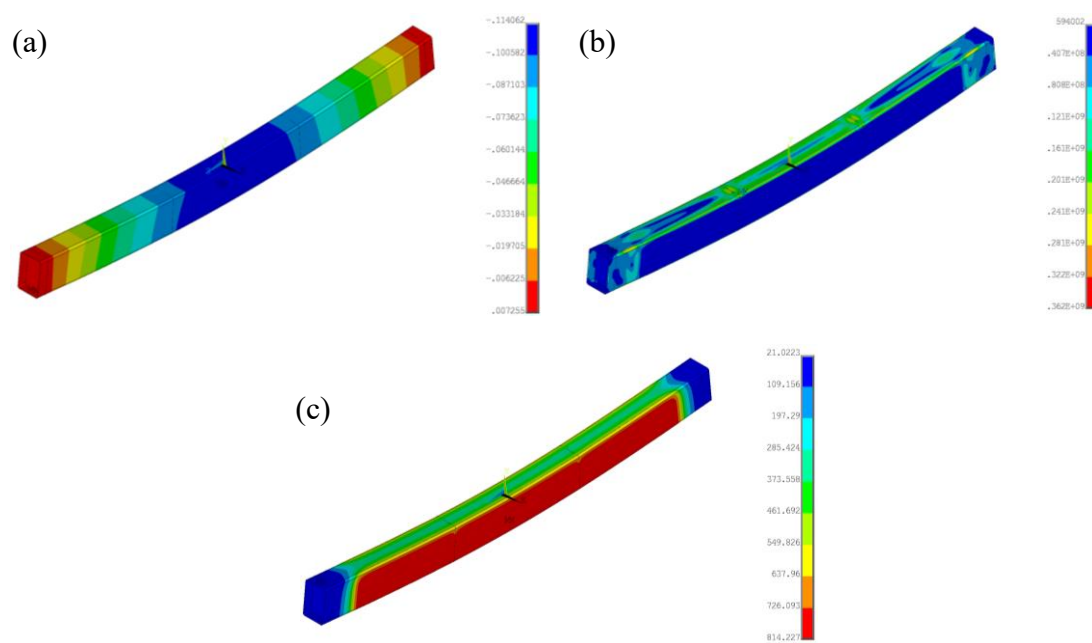
**Figura B.132 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4301 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



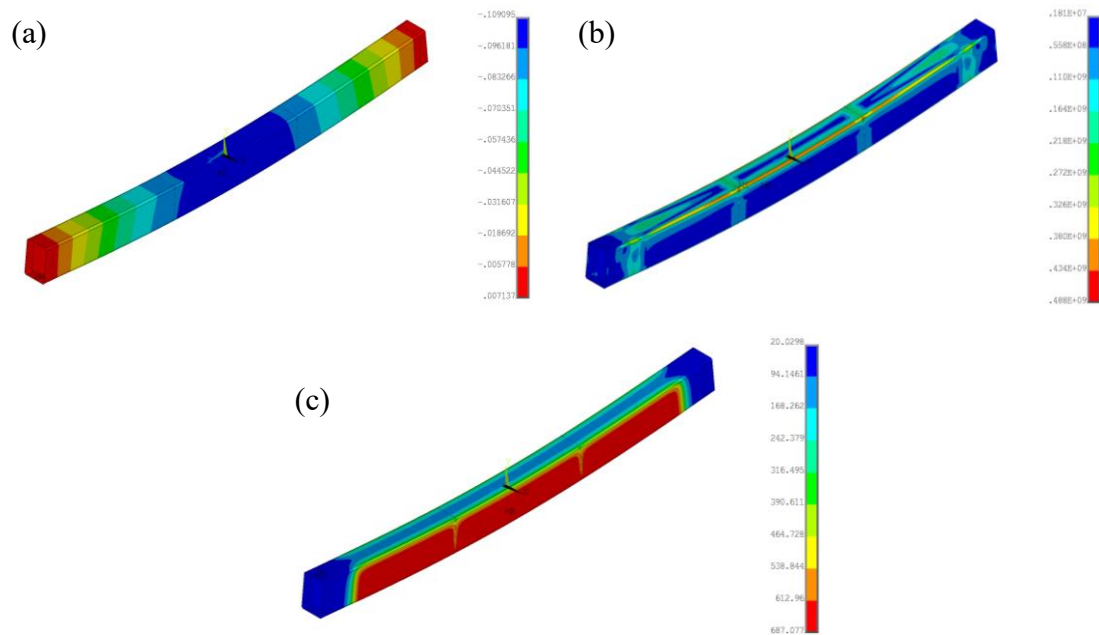
**Figura B.133 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4301 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



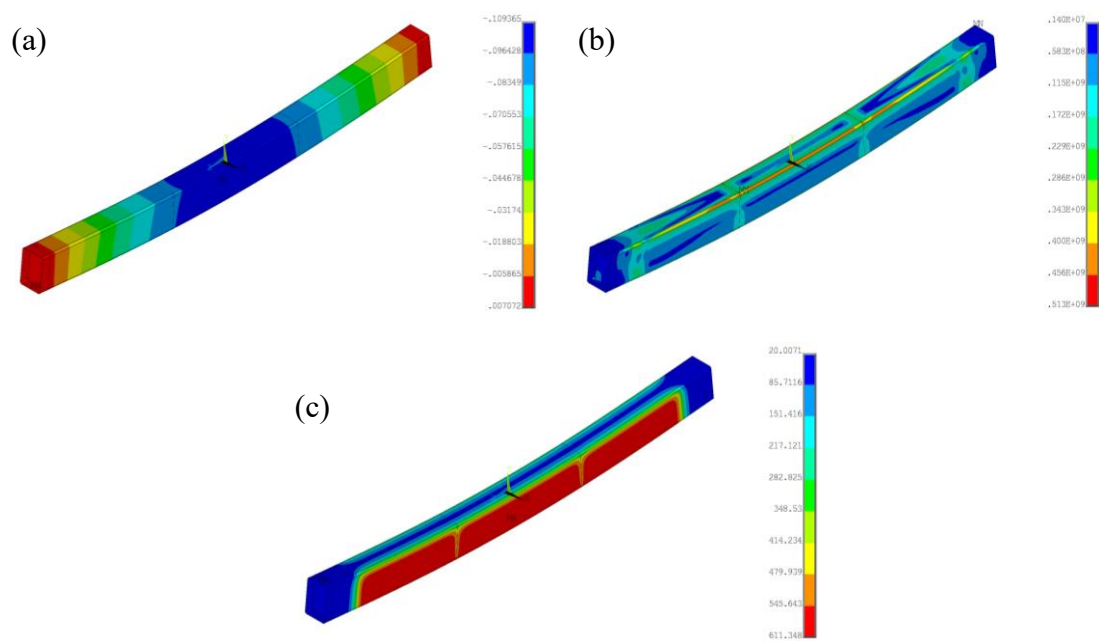
**Figura B.134 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4301 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



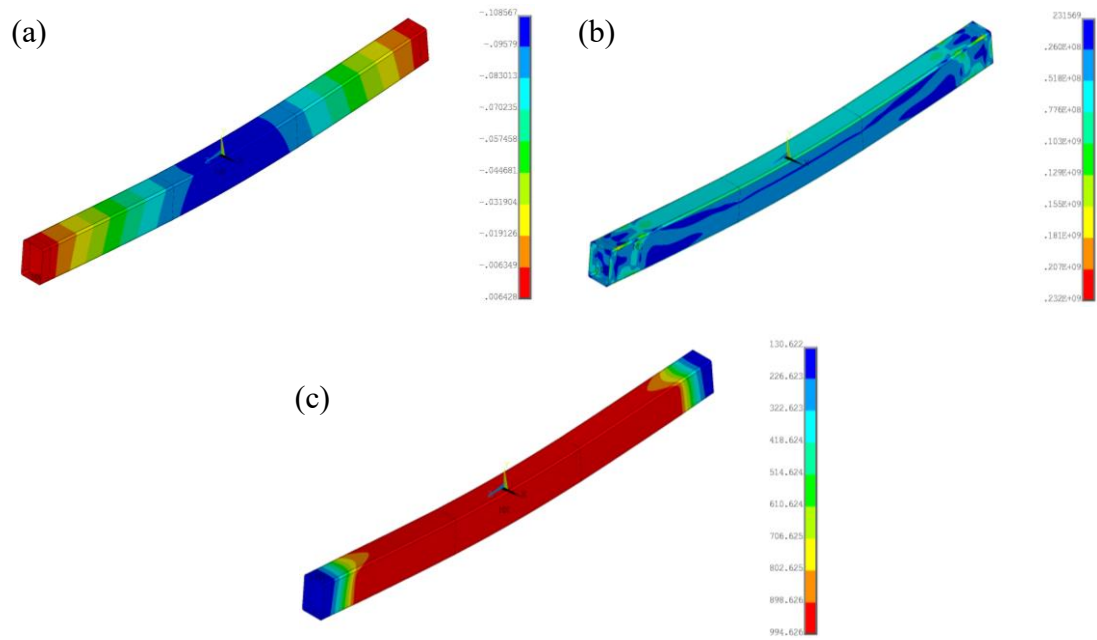
**Figura B.135 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4016 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



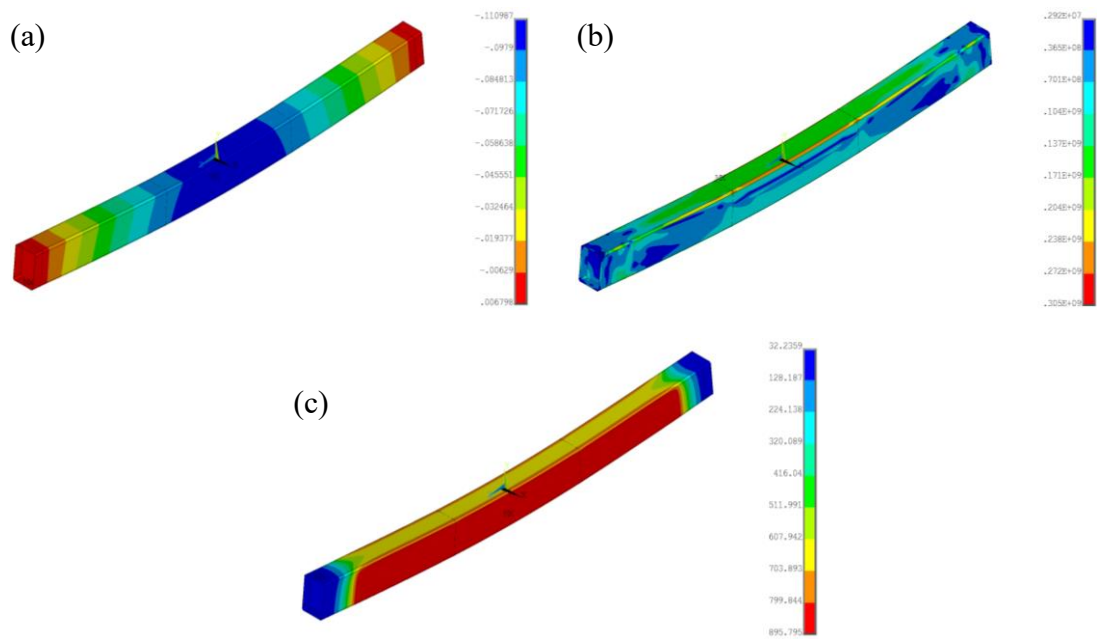
**Figura B.136 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4016 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



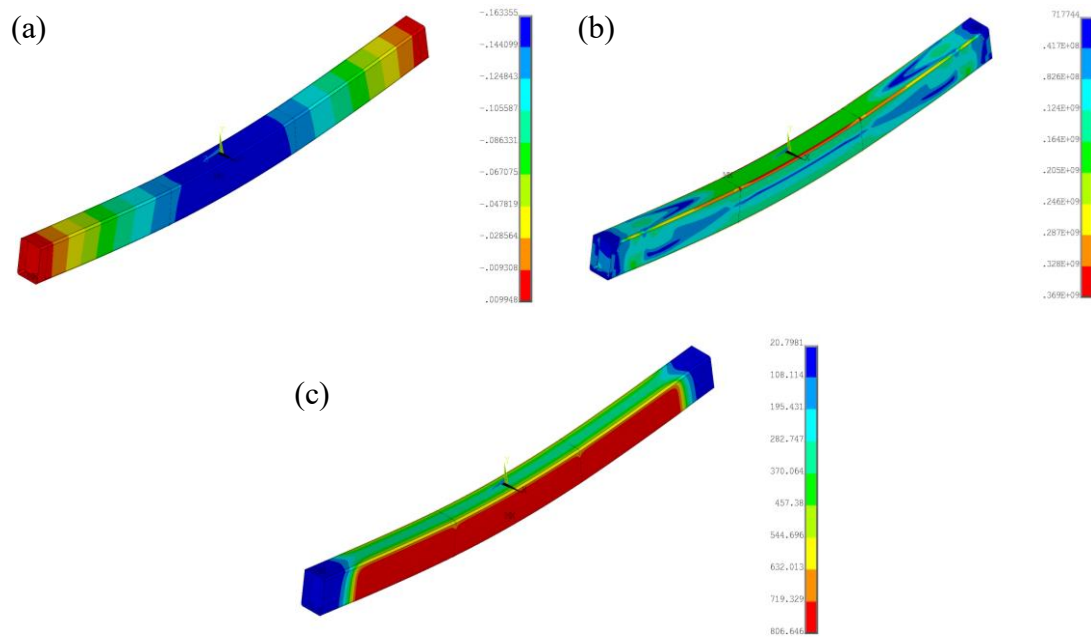
**Figura B.137 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4016 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



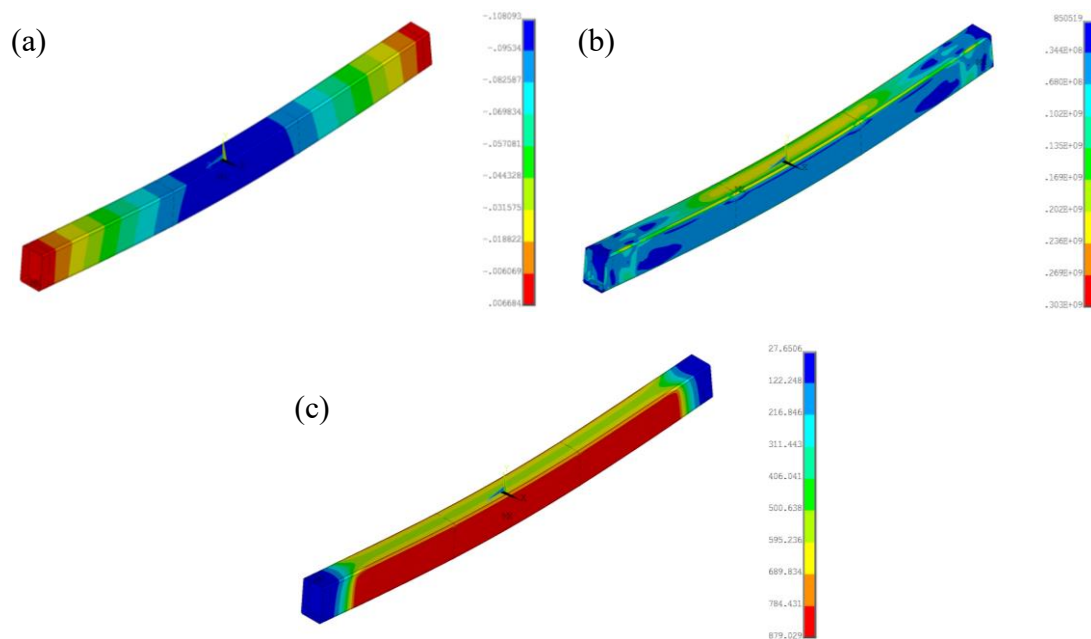
**Figura B.138 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4571 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



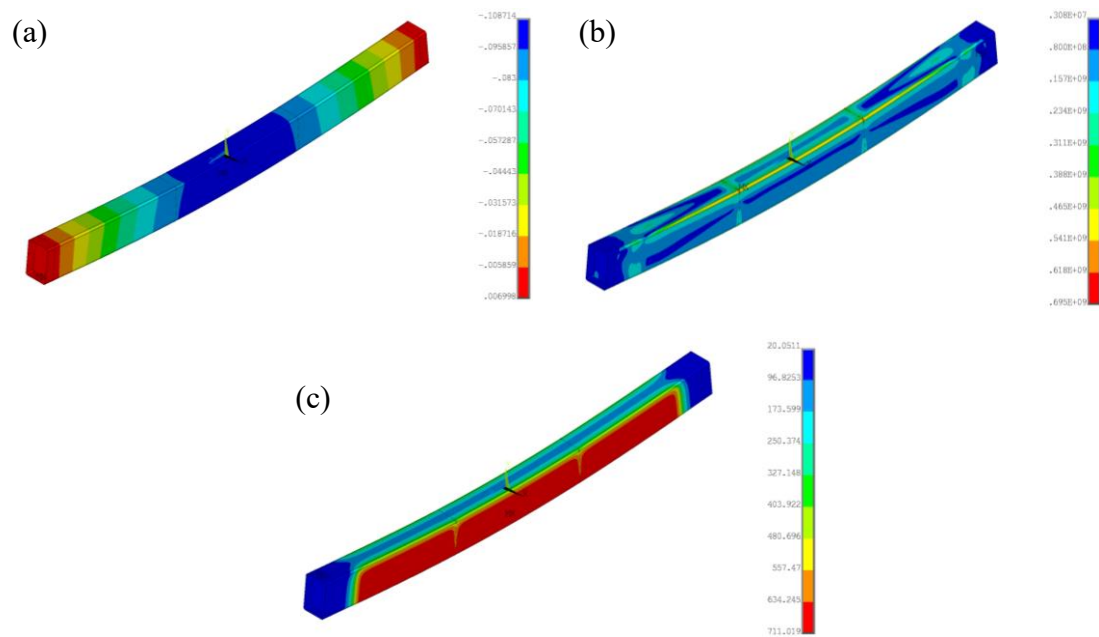
**Figura B.139 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4571 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



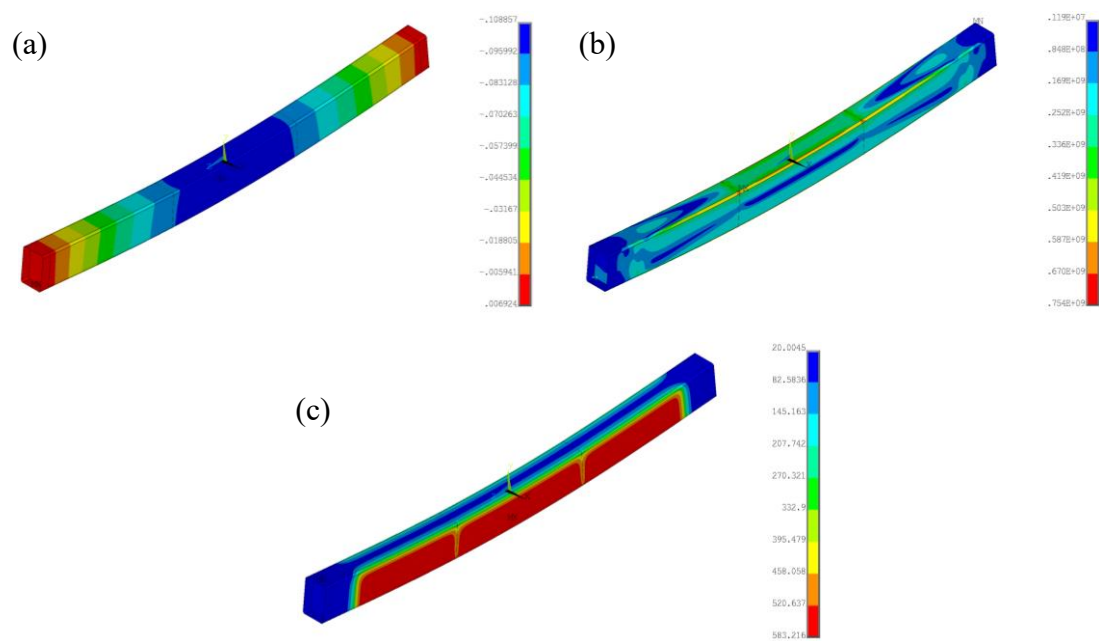
**Figura B.140 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4571 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.141 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4462 para nível de carregamento 0.2, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.142 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4462 para nível de carregamento 0.4, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**



**Figura B.143 – Amostra RHS300x200x8 material 1.4462 para nível de carregamento 0.6, (a) deslocamento no eixo y, (b) tensões de von Mises e (c) temperatura da viga.**

## ANEXO C

Nesta sessão, são apresentados os gráficos das análises térmicas e termomecânicas paramétricas.

### C.1. Gráficos Térmicos

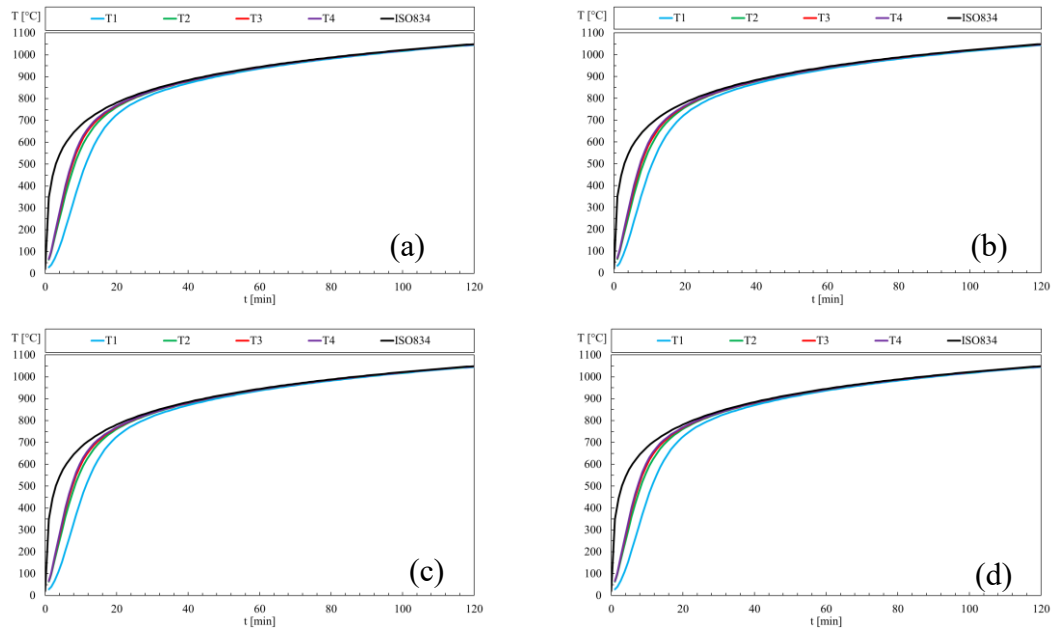
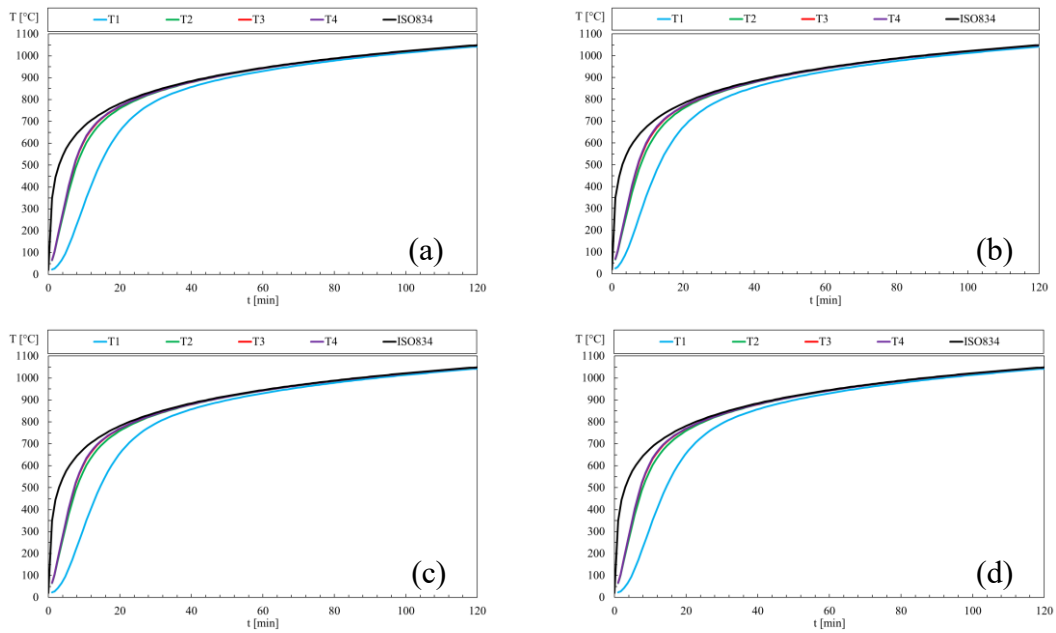
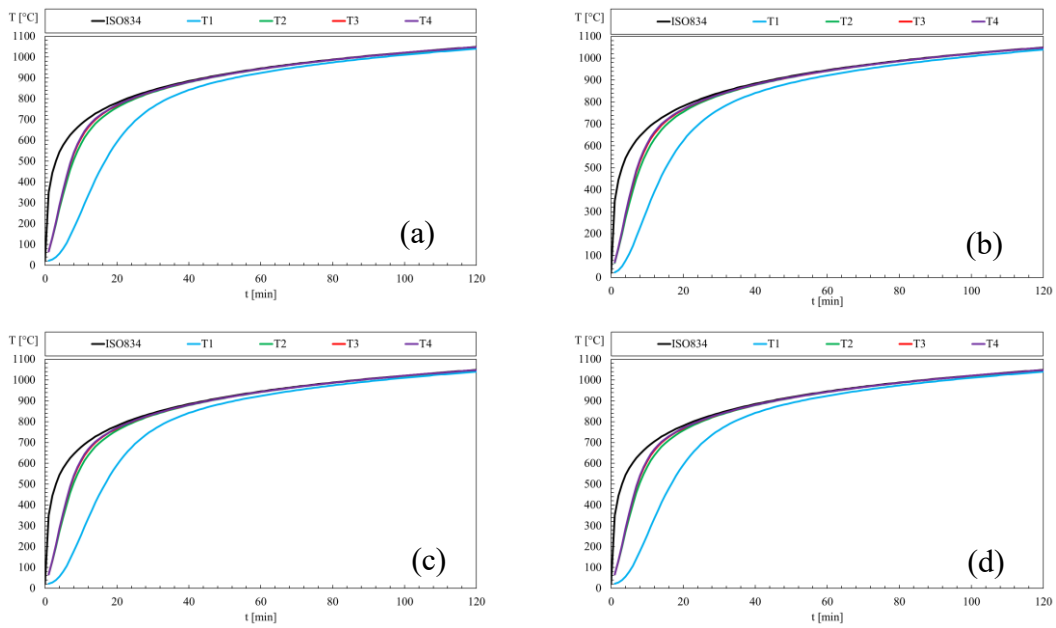


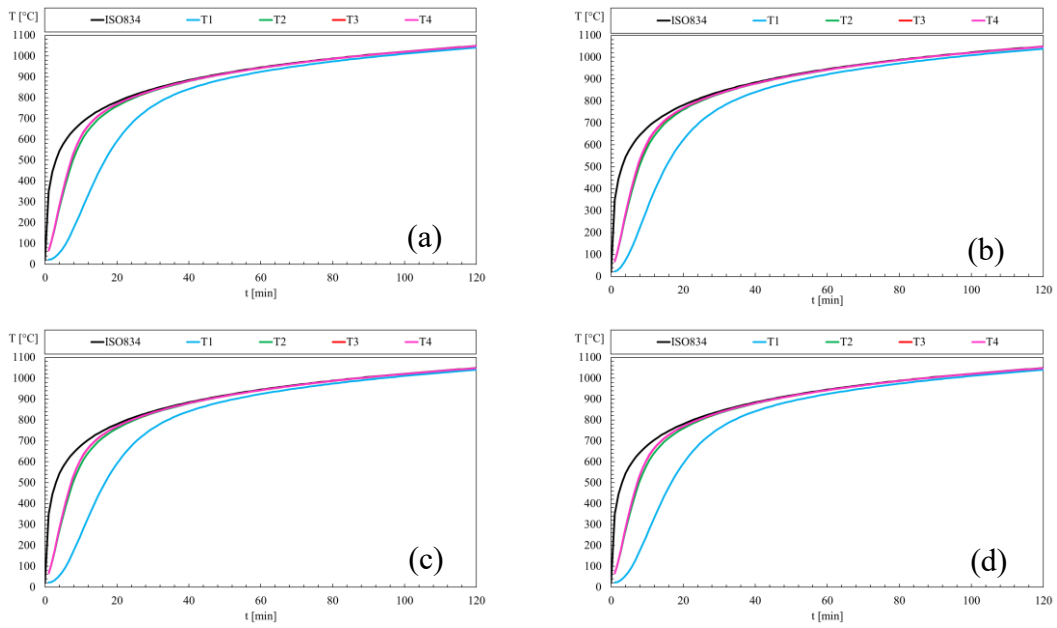
Figura C.1 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 100x50x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.



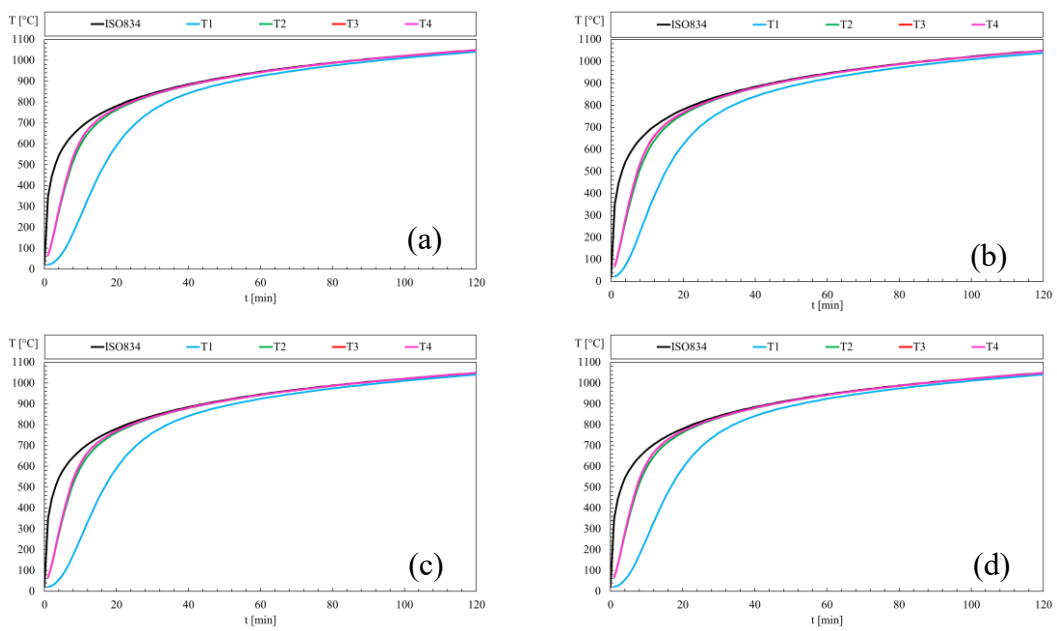
**Figura C.2 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 150x80x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**



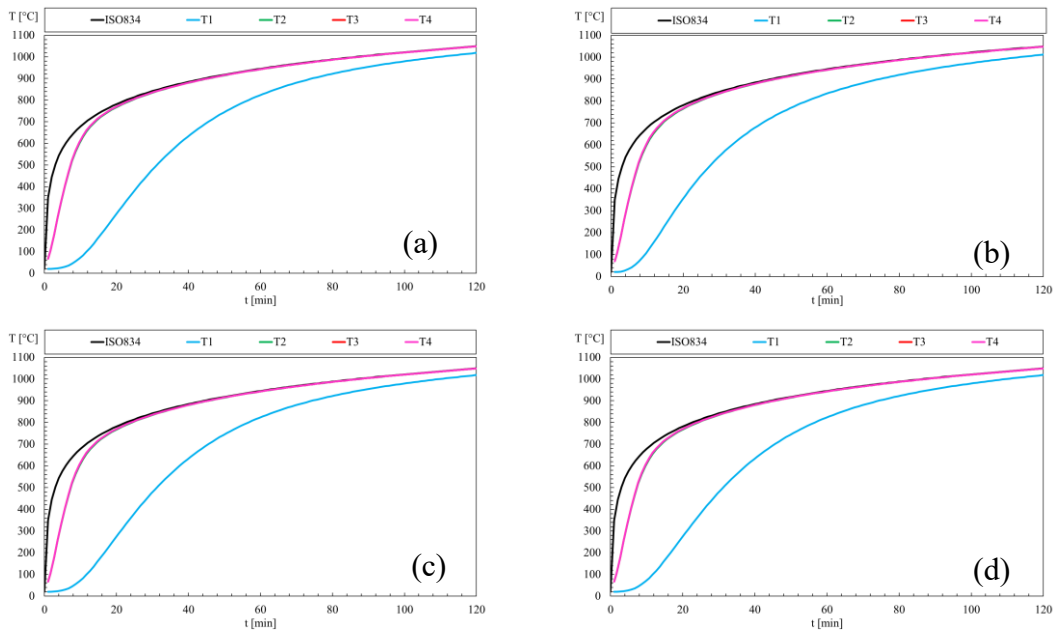
**Figura C.3 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 150x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**



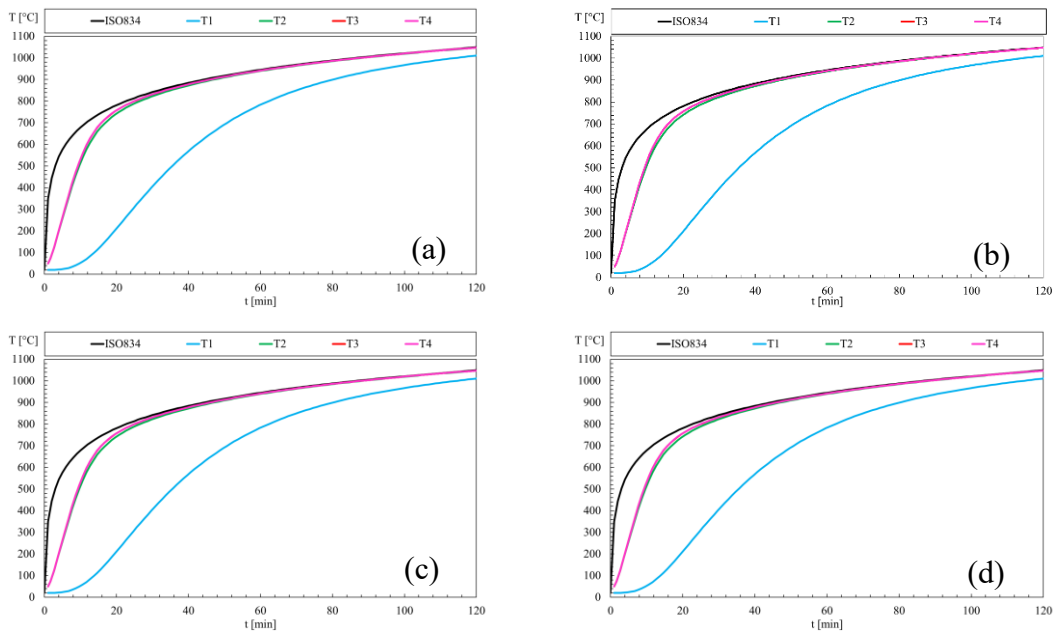
**Figura C.4 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 180x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**



**Figura C.5 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 200x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**



**Figura C.6 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 300x200x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**



**Figura C.7 – Gráficos das análises térmicas da amostra RHS 300x200x8, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**

## C.2. Gráficos Termomecânicos.

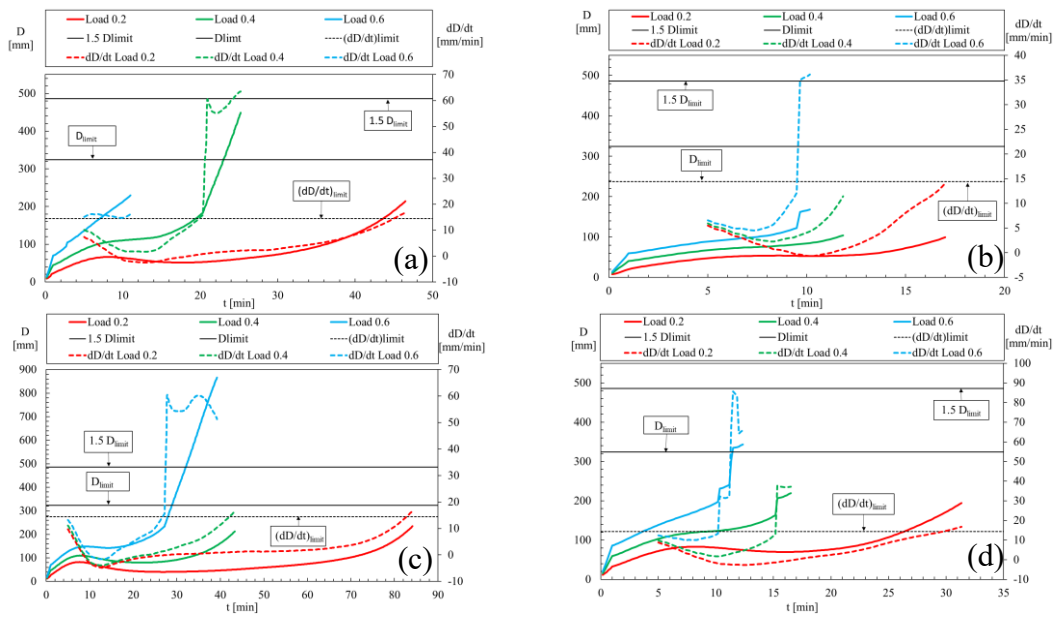


Figura C.8 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH100x50x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.

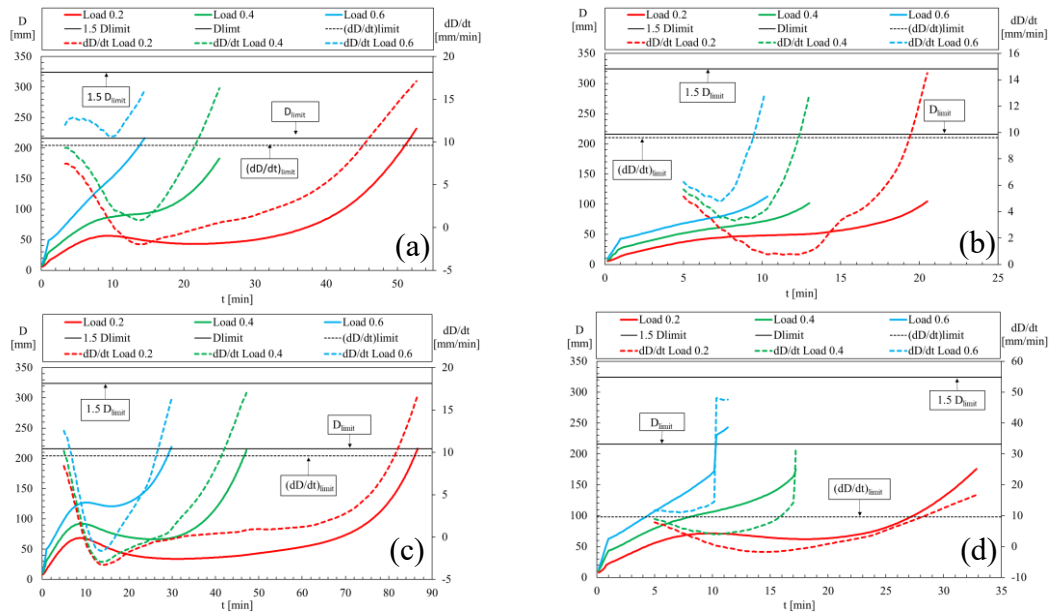


Figura C.9 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH150x80x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.

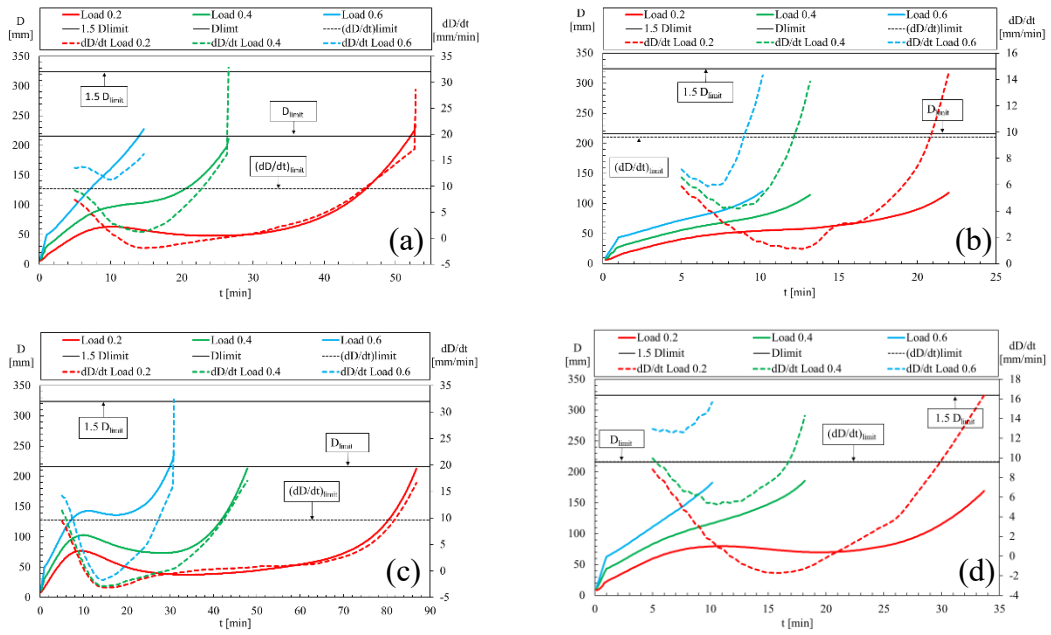


Figura C.10 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH150x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.

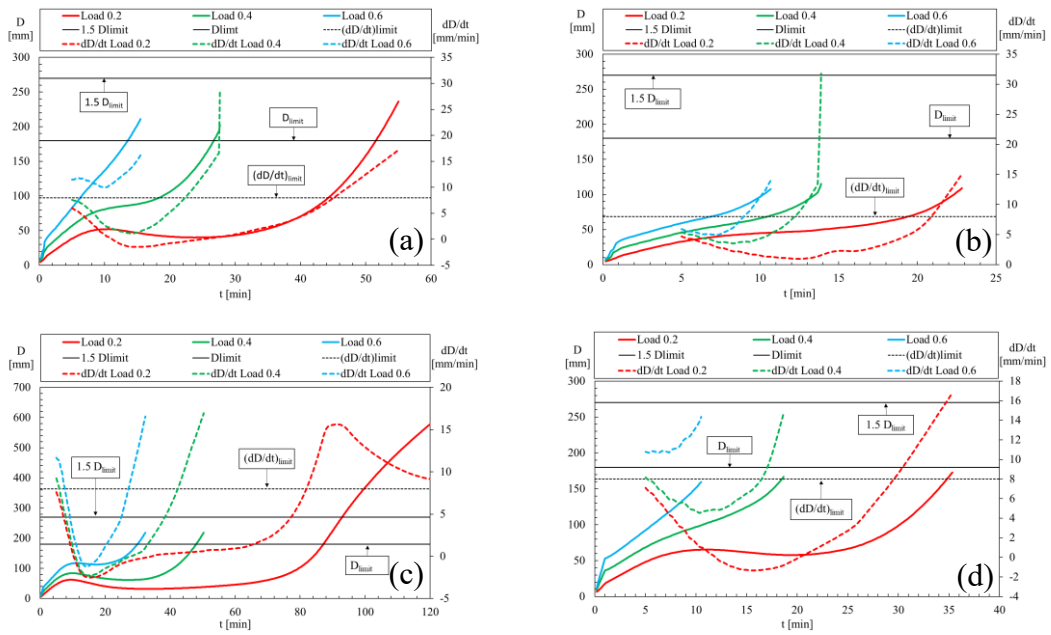


Figura C.11 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH180x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.

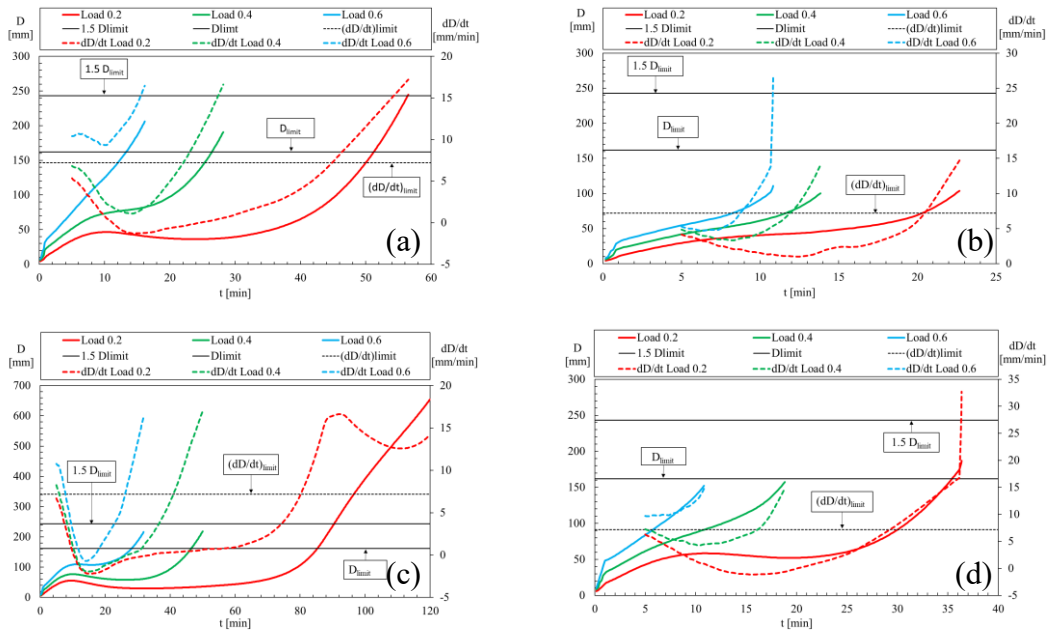


Figura C.12 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH200x100x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.

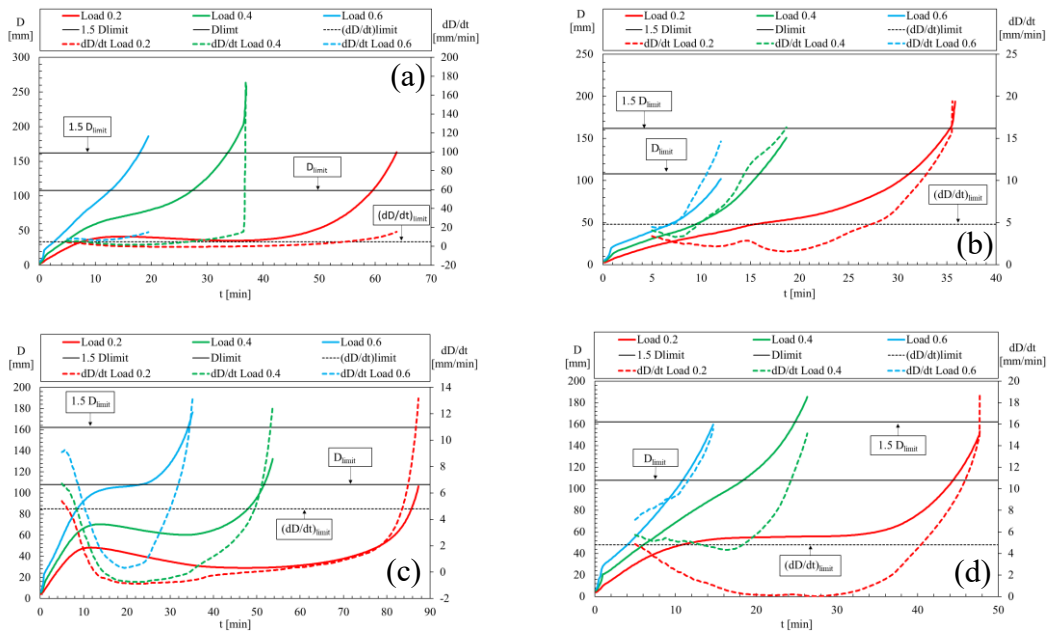
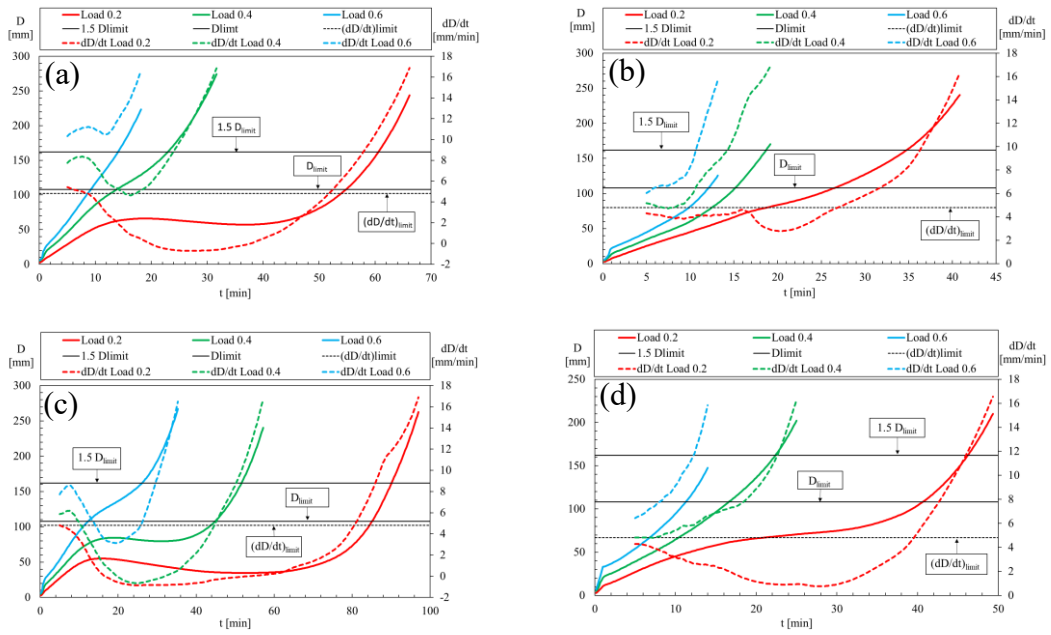


Figura C.13 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH300x200x5, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.



**Figura C.14 – Gráficos termomecânicos da amostra RSH300x200x8, (a) 1.4301, (b) 1.4016, (c) 1.4571 e (d) 1.4462.**