



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



JULIA ARAVEQUIA DE FREITAS

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ALTA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO**

UBERLÂNDIA

2023

JULIA ARAVEQUIA DE FREITAS

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ALTA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso em formato de artigo apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gregório Sandro Vieira

UBERLÂNDIA

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F866
2023

Freitas, Júlia Aravequia de, 1998-
Estudo numérico e experimental do efeito da alta
temperatura em elementos estruturais de aço [recurso
eletrônico] / Júlia Aravequia de Freitas. - 2023.

Orientador: Prof. Dr. Gregório Sandro Vieira.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Vieira, Prof. Dr. Gregório
Sandro, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

JULIA ARAVEQUIA DE FREITAS

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ALTA
TEMPERATURA EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso em formato de artigo apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia, 22 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gregório Sandro Vieira
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Joseph Salem Barbar
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima
Universidade Federal do Ceará

Estudo numérico e experimental do efeito da alta temperatura em elementos estruturais de aço

Numerical and experimental study of the effect of high temperature on structural steel elements

Julia A. Freitas ¹; Gregório Sandro Vieira ¹

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2121, 38400-90, Uberlândia - MG, Brasil

juliaravequia@ufu.br

gregorio.vieria@ufu.br

Resumo. Este artigo aborda a análise numérica e experimental do comportamento do aço, como material estrutural, submetido a alta temperatura. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência nas propriedades mecânicas do material aço quando sujeito a altas temperaturas com subsequente resfriamento. O estudo iniciou com o questionamento da influência do método de resfriamento em elementos de aço em altas temperaturas, considerando o impacto que esta pesquisa pode trazer para situações de incêndio no dia a dia. A metodologia consistiu em duas etapas, sendo a primeira a realização de ensaios experimentais executados em laboratório, com o objetivo de fornecer dados empíricos para a averiguação das propriedades do material, enquanto a segunda etapa consistiu na análise numérica de tração, de temperatura e de tração e temperatura simultaneamente. Tal análise foi realizada através do programa de elementos finitos ABAQUS. Os resultados mostraram que o aço, quando aquecido à temperatura de 350°C, sem a aplicação de tração simultaneamente ao aumento da temperatura, apresenta uma variação desprezível no seu comportamento.

Palavras-chave: altas temperaturas, elementos de aço, análise numérica, elementos finitos.

1 Introdução

Em edificações estruturadas em aço, a ocorrência de situações de incêndio representa uma das ações mais danosas que podem levar à instabilidade da estrutura, uma vez que as propriedades mecânicas do aço podem ser alteradas significativamente sob altas temperaturas. Atrelado a isso, o aço é um material que possui alta condutividade térmica, o que pode levar a um aumento súbito de temperatura e um consequente choque na

resistência da estrutura. O aumento da temperatura favorece a depreciação da resistência e rigidez dos elementos estruturais, contribuindo para o colapso parcial ou global do edifício, justificado pela diminuição do módulo de elasticidade e do limite de escoamento do aço. Assim, é imprescindível que haja um estudo sobre o comportamento do aço sob influência de altas temperaturas, para melhorar os processos de projeto estrutural nestas condições.

A redução precoce da resistência e rigidez de um elemento estrutural, mesmo para partes isoladas, pode não garantir a evasão total dos ocupantes da edificação no tempo necessário para realizar esta tarefa com segurança. Diante disso, justifica-se o uso de técnicas computacionais avançadas, como as baseadas no Método dos Elementos Finitos, para analisar o comportamento termomecânico de elementos isolados sob altas temperaturas, contribuindo para o entendimento acadêmico do comportamento desse material nas condições descritas.

Neste trabalho foi utilizado o software ABAQUS/Standard devido à sua capacidade de modelagem e versatilidade. Para calibração e validação dos modelos numéricos foram realizados ensaios experimentais em laboratório. No entanto, entende-se a dificuldade em realizar experimentos e testes em larga escala, o que dificulta a investigação global do comportamento dos materiais na edificação.

2 Revisão Bibliográfica

Dentre as normas brasileiras que existem sobre o tema, a principal é a NBR 14323, intitulada “Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio”, a qual foi editada pela ABNT em julho de 1999 e foi desenvolvida por algumas universidades brasileiras a partir da análise de diversas normas estrangeiras de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio, como a pré-norma europeia Eurocode 3. A norma europeia (IPQ, 2010) indica reduções de cerca de 25% da resistência para temperaturas já acima dos 200°, temperatura esta que, de acordo com a norma brasileira NBR 5628 (ABNT, 2001), pode ser atingida em menos de cinco minutos de atuação do fogo. A norma brasileira em sua versão atual (ABNT, 2013) apenas remete às considerações propostas pelo Eurocódigo, entretanto, em versões anteriores, também apresentava curvas para o fator de redução destas propriedades, porém, com valores mais otimistas que os adotados pelos europeus.

Se tratando de um estudo de temperatura em elementos em aço, uma das primeiras análises que deve ser realizada é como ocorre a distribuição da temperatura em um perfil. ZHAO E SHEIN (1999) realizaram um estudo teórico-experimental do comportamento de pórticos de aço sem proteção contra incêndio, submetidos a diferentes níveis de carregamento, temperatura e condições de contorno e concluíram que a distribuição de temperatura nos perfis de aço é não uniforme em condições reais de incêndio e que a taxa de aquecimento da temperatura influencia a resistência ao fogo das estruturas de aço, sendo que quanto mais rápido o aquecimento maior a temperatura limite.

Sob esse aspecto, é necessário entender os conceitos relacionados aos tipos de proteção contra altas temperaturas que podem envolver os elementos estruturais, os procedimentos para obtenção da elevação de temperatura nos elementos e os métodos para obtenção das resistências de projeto. MARTINS (2000) e SILVA (2001) tratam desses temas em seus trabalhos. Além disso, MARTINS (2000) desenvolve um programa de dimensionamento de barras tensionadas, comprimidas, flexionadas e submetidas a esforços combinados em situação de incêndio e temperatura ambiente.

A partir do contexto de ferramentas computacionais, FERNANDES (2004) apresentou um programa baseado em Métodos de Elementos Finitos, para análise geométrica não linear de pórticos de aço planos sob fogo. Foram realizadas análises de elementos estruturais isolados e pórticos planos, discretizando as estruturas em elementos de barra. Os resultados numéricos da análise estrutural de barras isoladas e de estruturas planas são apresentados e comparados com os resultados obtidos pelo programa computacional SAFIR.

Até agora, todas essas investigações científicas foram baseadas em conceitos teóricos e ferramentas computacionais de análise estrutural. Isso se deve ao alto custo dos equipamentos, materiais e mão de obra necessários para a realização dos testes.

3 Metodologia

O planejamento experimental para este trabalho foi desenvolvido em duas fases, sendo a primeira a realização de ensaios experimentais executados em laboratório, com o objetivo de fornecer dados empíricos para a averiguação das propriedades do material, enquanto a segunda etapa consistiu na análise numérica de tração, de temperatura e de tração e temperatura simultaneamente.

3.1 ENSAIO EXPERIMENTAL

Para os testes experimentais foram utilizados corpos de prova de aço SAE 1020, o qual consiste em um aço ao carbono comumente utilizado para cementação, cuja composição inclui os elementos carbono, manganês, enxofre, fósforo e ferro. Os corpos de prova foram produzidos especialmente para este trabalho. Sua geometria pode ser observada na Figura 1.

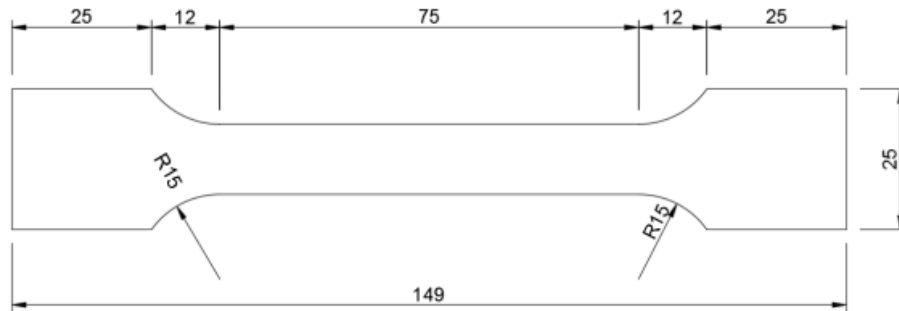


Figura 1: Geometria do corpo de prova, unidades em mm

Foram testados três corpos de prova em laboratório, cada um correspondente a um grupo. O primeiro grupo, denominado ensaio A, foi submetido, à temperatura ambiente, diretamente ao ensaio de tração na máquina de caracterização de materiais (Figura 2), cujo objetivo consistiu em determinar a resistência a tração do corpo de prova sem efeito da temperatura.



Figura 2: Máquina de caracterização de materiais

Os outros dois grupos foram identificados e diferenciados entre os ensaios B e C, sendo submetidos ao aumento de temperatura no interior de um forno elétrico (Figura 3), antes da caracterização do material.



Figura 3: Forno elétrico

Os corpos de prova dos grupos B e C diferem um do outro pelo método de resfriamento. O primeiro foi resfriado à temperatura ambiente, enquanto o segundo foi imerso em água por 5 minutos após a exposição térmica.

Três termopares tipo K (GG-K-24-25) foram acoplados ao equipamento para seguir a curva de aquecimento proporcionada pelos quatro resistores dispostos dentro do forno elétrico. O programa *Catman* foi utilizado para monitorar a medição dos termopares e facilitar a preparação da curva de aquecimento.

Apesar da disposição de três termopares, apenas dois forneceram dados válidos. Foi desconsiderado o termopar denominado sensor 2 (Figura 4).



Figura 1: Equipamento de medição de temperatura

A Figura 5 apresenta o gráfico da temperatura, em °C, pelo tempo, em segundos, dentro do forno registrado pelos termopares. Como pode ser observado, a temperatura máxima atingida pelo forno, registrada pelo sensor 1, foi de 355°C. O sensor 3, devido à sua posição dentro do forno, registrou uma temperatura um pouco menor, de 348°C.

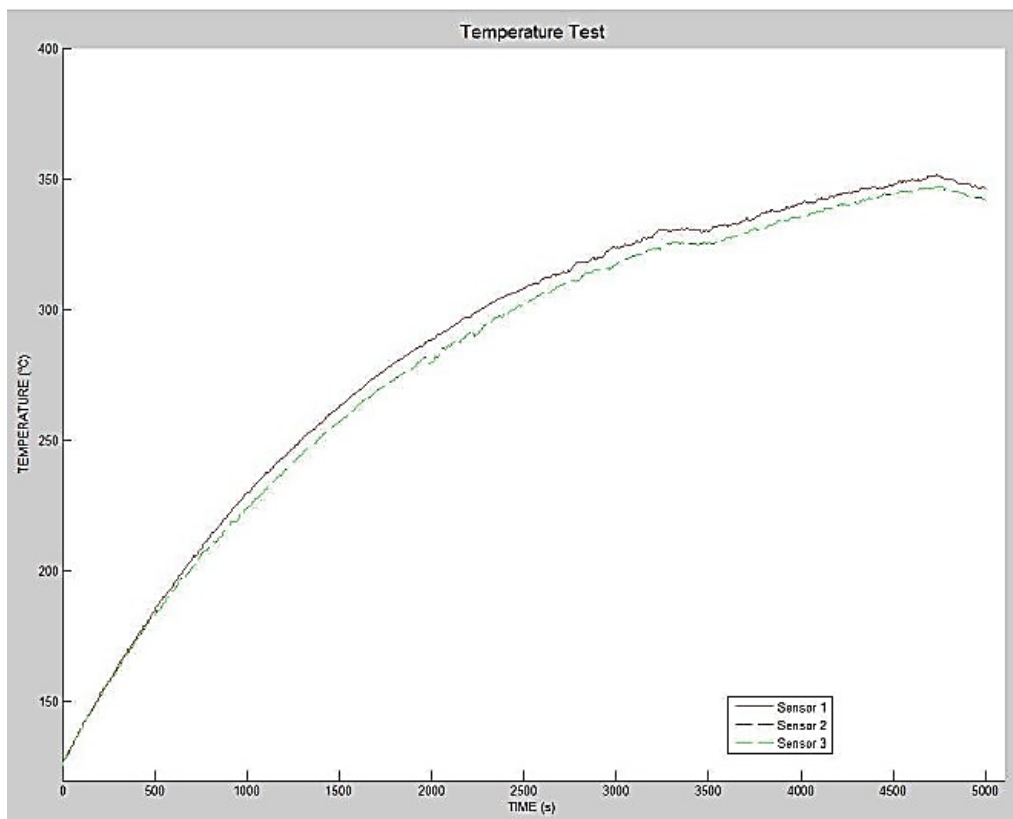


Figura 2: Gráfico de temperatura (°C) x tempo (s) dentro do forno

Os corpos de prova correspondentes aos grupos B e C foram dispostos dentro do forno assim que este alcançou 250°C e a cronometragem foi iniciada quando atingiu 300°C. O tempo de exposição, após atingir 300°C, foi de 5 minutos para ambos os corpos de prova.

Na Figura 6 pode ser observado os três corpos de prova, de cada um dos grupos, após o ensaio de tração.



Figura 3: Amostras pertencentes ao grupo A, B e C

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TRAÇÃO

O processo de modelagem foi realizado utilizando o *software* ABAQUS, o qual consiste em um programa baseada no método dos elementos finitos, que pode ser utilizada na simulação de problemas de diversas naturezas, entre eles: eventos dinâmicos, eletromagnéticos, térmicos e elétricos, por exemplo. Em um primeiro momento, devido ao desafio de realizar a simulação sob efeito térmico, a modelagem numérica foi realizada apenas incluindo a relação tensão-deformação obtida experimentalmente.

O processo de simulação do ABAQUS é realizado em três etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. O pré-processamento consiste em definir os dados de entrada do modelo físico. Nesta etapa, são definidas algumas condições iniciais, como a geometria do modelo, materiais, propriedades da seção, montagem das peças (se o modelo não for constituído de apenas uma peça), as condições de contorno e carregamento, a malha, entre outras condições. Cuidados especiais devem ser tomados com as unidades utilizadas e sua compatibilidade, pois o programa trabalha

com unidades específicas. No caso deste trabalho, foram utilizadas as unidades Newton, milímetro e segundo.

A simulação é a etapa de resolução de problemas. Nesta etapa, foi utilizado o algoritmo de resolução *ABAQUS/Standard*, considerando que a escolha do solver dependerá do fenômeno a ser simulado. No caso deste trabalho, este algoritmo foi escolhido por se tratar de uma simulação menos complexa. Por fim, o pós-processamento consiste na análise dos resultados da modelagem. O ABAQUS permite uma visão detalhada e diversificada onde é possível analisar configurações deformadas, contornos, animações, gráficos, entre outros. Todo o processo de coleta dos resultados é realizado na aba *Visualização*.

Após definir a geometria da peça, foi aplicada a condição de contorno de engaste em uma extremidade do modelo enquanto o carregamento foi aplicado na extremidade oposta. Para obtenção de resultados mais precisos, optou-se pelo método de controle de deslocamento, o qual consiste na aplicação de um deslocamento ao invés da aplicação de uma força, de maneira que a força obtida nos resultados não é coincidente com os passos de carga aplicados, mas sim com a força de reação que impede este deslocamento. Quando o método de controle de deslocamento é adotado, o modelo adquire menor rigidez, o que o torna mais próximo da realidade. Ao validar um modelo, é importante verificar se é melhor aplicar controle de força ou deslocamento, visto que há casos em que o controle de força aproxima o modelo da realidade, o que não ocorreu neste trabalho.

Para a aplicação deste método, foi utilizada a opção *Interação*, na qual foi criada a restrição de corpo rígido e foi utilizado um ponto de referência, de forma que, ao se determinar um deslocamento para aquele ponto, toda a face da extremidade do modelo seja deslocada simultaneamente. Assim, foi atribuído ao ponto de referência um deslocamento de 23,83 mm, de acordo com o deslocamento máximo obtido dos resultados experimentais (Figura 7).

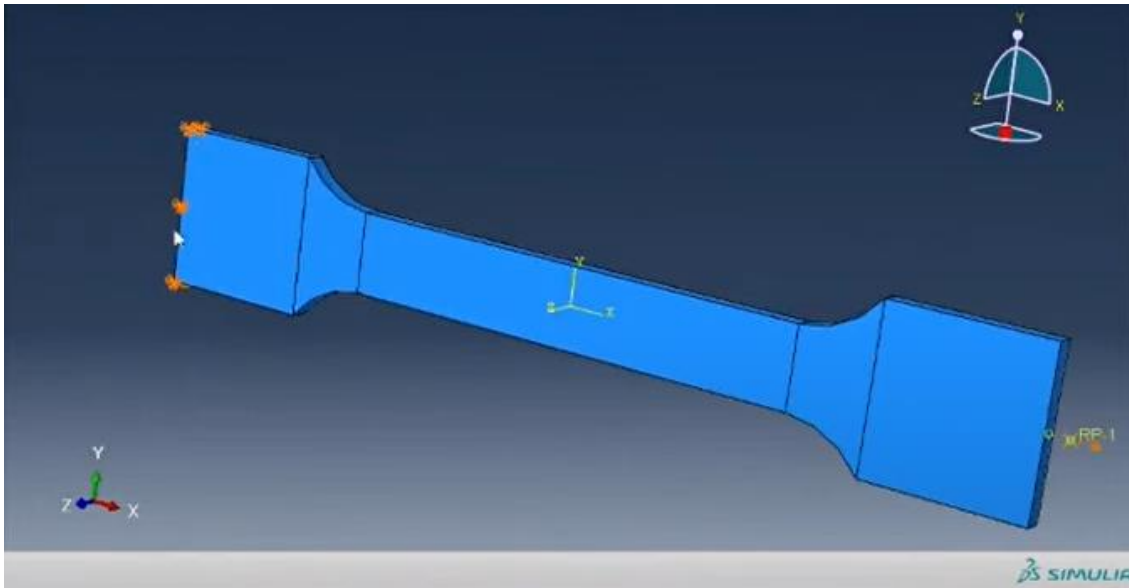


Figura 7: Modelo com condições de contorno e carregamento

Em seguida, a malha foi aplicada ao modelo, sempre tomando cuidado com o seu refinamento para obter-se resultados precisos e o mais próximo possível dos resultados experimentais (Figura 8).

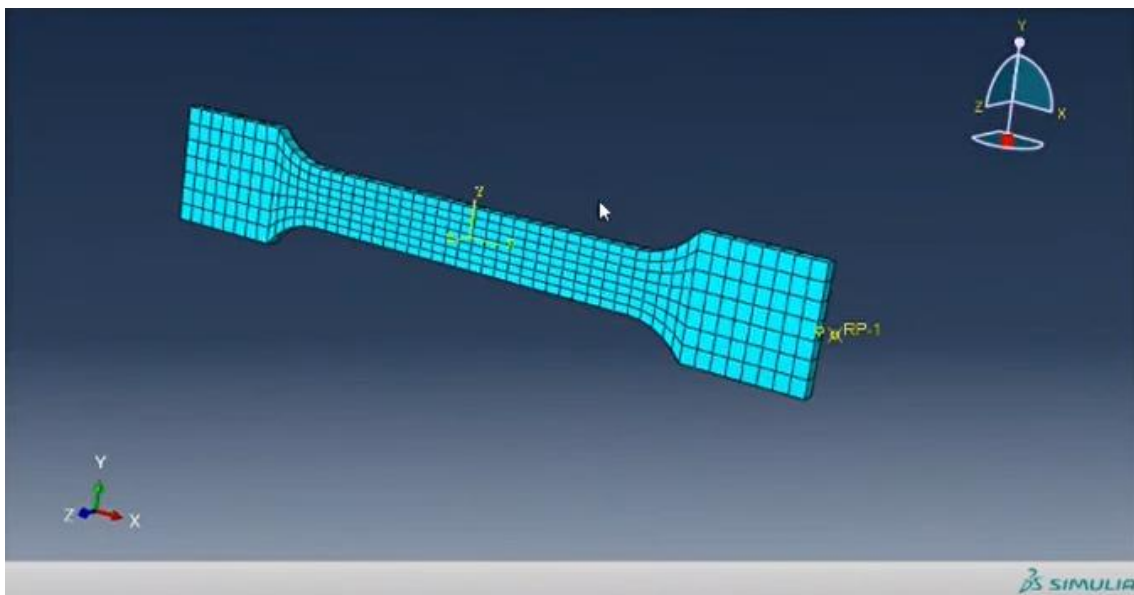


Figura 8: Malha aplicada ao modelo

A malha foi feita com 357 elementos e o tipo aplicado foi o C3D8R, que é um dos melhores elementos do ABAQUS, tanto em termos de custo computacional quanto em termos de resultados, pois geralmente gera resultados satisfatórios. O refinamento utilizado na malha foi de 3mm, o que foi considerado um bom tamanho com base na comparação do resultado numérico com o experimental.

Após o refinamento da malha e das condições de contorno, foi realizada a etapa de pós-processamento, que é a apresentação dos resultados. Nessa etapa, foi possível analisar se os resultados obtidos numericamente eram precisos e se estavam coerentes com os obtidos nos testes experimentais.

3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TEMPERATURA

No primeiro momento da simulação numérica empregada neste estudo, foi simulado apenas o ensaio de tração no modelo numérico. Neste segundo momento, porém, será apresentado o modelo com a influência da temperatura. Os modelos térmicos são aqueles cujos dados de entrada são, além da sua geometria, o comportamento ao longo do tempo do seu calor específico, de sua condutividade térmica e de sua densidade. Para simular as altas temperaturas foi utilizada a curva obtida pelos termopares no forno elétrico, de forma que se alcançasse resultados os mais próximos possíveis ao experimental. O processamento dos modelos térmicos forneceu, como resultado, isotermas de temperatura ao longo do tempo para todos os elementos que constituem o corpo de prova.

A execução da modelagem iniciou-se inserindo como dados de entrada dois parâmetros que são extremamente importantes na construção de modelos térmicos, sendo eles a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \text{ E-}0,08$ e o zero absoluto igual a -273°C . Em seguida, cria-se a geometria do modelo. Neste caso, a geometria criada foi a mesma utilizada no modelo anterior. O próximo passo é inserir as propriedades do material pertinentes à análise térmica, sendo elas a densidade do aço, a condutividade térmica e o calor específico. Importante se atentar, em todos os tipos de simulações, às unidades utilizadas.

Para dar continuidade ao modelo, criou-se uma seção e nela atribui-se as propriedades inseridas do material. Em seguida, estipulou-se uma temperatura inicial já predefinida, no caso deste trabalho, igual a 20°C e, em seguida, criou-se o *step* de transferência de calor. Para atribuir a transferência de calor ao modelo configurou-se um tempo de 5000s correspondente à curva de temperatura do forno elétrico e definiu-se os incrementos de temperatura atribuídos automaticamente a cada 60s e um máximo de 50°C por incremento. Posteriormente, configurou-se as propriedades da malha. O tamanho desejado para a malha, neste caso, manteve-se em 3mm e alterou-se o tipo de elemento

finito adequado para uma análise térmica. Dessa forma, alterou-se o tipo de elemento para DC3D8, que é o elemento finito de transferência de calor (Figura 9).

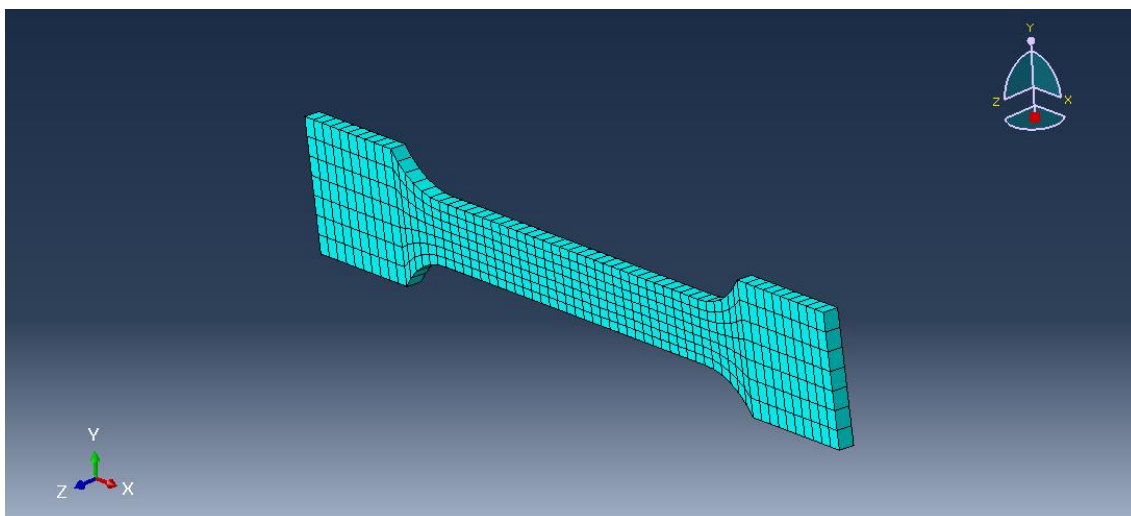


Figura 9: Malha do modelo térmico

O próximo passo foi inserir os dados da curva do forno elétrico. Para isso, adicionou-se uma amplitude tabular e nela inseriu-se os dados obtidos da curva de temperatura da análise experimental. Já no passo *Interação*, atribui-se as propagações de calor ao modelo. Nesta etapa, é possível definir se alguma parte da estrutura não está em contato com o aumento da temperatura, por exemplo, e realizar essas delimitações. Neste trabalho não houve estas diferenciações, de forma que foi configurado a convecção e a radiação para todo o corpo de prova.

Por fim, executou-se o modelo e analisou-se os resultados.

3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TRAÇÃO E TEMPERATURA

Com os resultados obtidos no modelo térmico, iniciou-se o modelo termo estrutural. Nesta modelagem, além do fato da geometria e da malha necessitarem ser iguais ao do modelo térmico, também será inserido como dados de entrada as vinculações, os carregamentos, as propriedades do material, além do arquivo obtido da análise térmica. Dessa forma, acrescenta-se ao modelo termo estrutural os efeitos da variação de temperatura simultaneamente com as ações de carregamento atuantes no modelo. Devido às limitações experimentais, não foi possível neste trabalho verificar experimentalmente os efeitos da variação da temperatura simultaneamente com as ações atuantes no modelo, porém, para efeito de estudo, serão apresentados os resultados obtidos numericamente.

Por ser o mesmo modelo geométrico, alterando-se apenas algumas propriedades do material e ações atuantes, na etapa *Part* não houve modificações. Uma das principais mudanças que foi necessário se atentar foi a inclusão das propriedades mecânicas do material aço, que não havia sido inserindo no modelo térmico, sendo elas o módulo de elasticidade, a expansão e as propriedades plásticas de acordo com a variação da temperatura.

Em seguida, na etapa *Step* acrescentou-se as condições iniciais de contorno, temperatura e carregamento. Configurou-se uma temperatura inicial de 20°C, as condições de contorno de engaste em uma extremidade e, por fim, definiu-se a características do carregamento, sendo ela uma análise geral do tipo estático. Determinou-se que seria aplicada a carga total estipulada, considerando as não linearidades geométricas, que o incremento seria de no máximo 10000 e, no processo de estabilização automática, estabilizou-se a energia específica dissipada fracionada.

Na etapa *Load* inseriu-se a força que será processada nesta etapa do carregamento. Atribui-se uma força do tipo pressão, porém no sentido negativo para ser entendido como uma força de tração, de magnitude igual à 16.606 N, correspondente a força máxima obtida nos resultados experimentais. Em seguida, acrescentou-se o *step* do aumento de temperatura, adicionando uma temperatura predefinida que será a temperatura alcançada no modelo térmico executado anteriormente. Dessa forma, o modelo estrutural roda a partir dos resultados térmicos já obtidos (Figura 10).

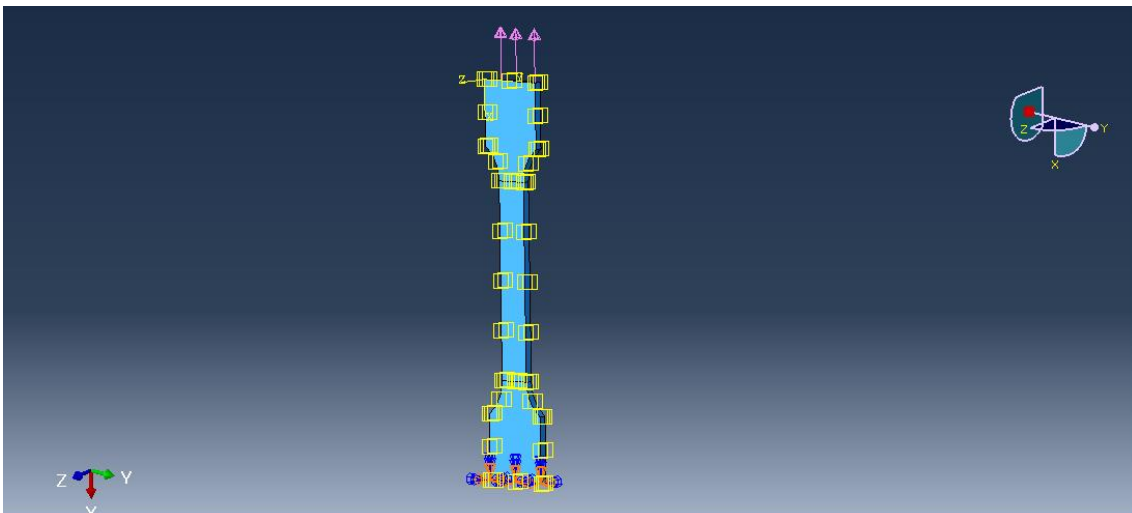


Figura 10: Condições atuantes no modelo

Para concluir, alterou-se o elemento finito da malha novamente para C3D8R, que é o tipo de elemento utilizado para a análise da tração e, por fim, executou-se o modelo.

4 Resultados

4.1 ENSAIO EXPERIMENTAL

Os resultados obtidos das análises experimentais e as equações utilizadas para alcançar estes resultados serão apresentadas a seguir.

Inicialmente, para o cálculo do módulo de Young foi utilizada a Equação 1:

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

Sendo:

E: Módulo de Young ou módulo de elasticidade (MPa)

$\Delta\sigma$: Variação de tensão (MPa)

$\Delta\varepsilon$: Variação da deformação (mm/mm)

Em seguida, foi realizado o cálculo do coeficiente de Poisson através da Equação 2:

$$\nu = -\frac{\frac{\Delta A}{A_0}}{2 * \frac{\Delta l}{l_0}} \quad (2)$$

Sendo:

ν : Coeficiente de Poisson (adimensional)

ΔA : Variação da área (mm²)

A_0 : Área inicial (mm²)

Δl : Variação do comprimento (mm)

l_0 : Comprimento inicial (mm)

Os próximos cálculos realizados foram da tensão de escoamento, tensão de ruptura e tensão última. As três tensões se diferenciam de acordo com o gráfico tensão x deformação, conforme pode ser observado na Figura 11:

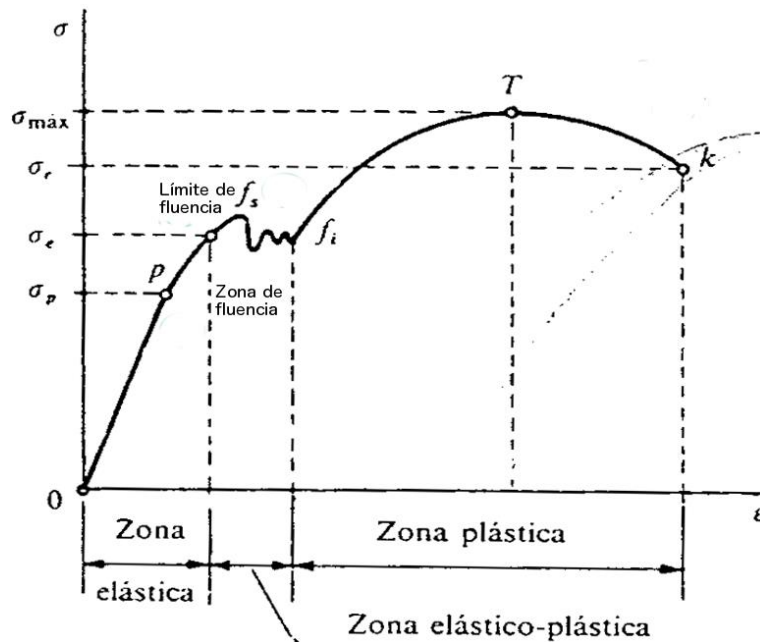


Figura 11: Propriedades mecânicas da curva tensão x deformação

A tensão de escoamento (σ_e) é a tensão máxima que pode ser aplicada onde a deformação é elástica, ou seja, se retirada esta tensão o material retorna a sua geometria inicial. A tensão última (σ_u ou $\sigma_{máx}$) é a tensão máxima que pode ser aplicada antes de romper o material. Já a tensão de ruptura (σ_r), como o próprio nome diz, é a tensão que romperá o material. Os três valores são calculados através da Equação 3:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Sendo:

σ : Tensão (MPa)

F : Força (N)

A : Área (mm^2)

Por fim, foi calculada a deformação última através da Equação 4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Sendo:

ε : Deformação (mm/mm)

Δl : Variação do comprimento (mm)

l_0 : Comprimento inicial (mm)

O deslocamento máximo foi obtido através dos dados obtidos no ensaio de tração pela máquina de caracterização dos materiais. Todos os resultados encontrados podem ser analisados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos corpos de prova

Corpo de prova	A	B	C
Módulo de Young (MPa)	13022	14151	15472
Coefficiente de Poisson	0.24	0.25	0.25
Tensão de escoamento (MPa)	292.49	321.02	294.55
Tensão de ruptura (MPa)	281.54	331.05	293.19
Tensão última (MPa)	428.33	449.13	435.22
Deformação última (mm/mm)	0.174	0.233	0.163
Deslocamento máximo (mm)	23.83	23.02	23.47

Após aquecimento e resfriamento, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de caracterização do material. Seguem os gráficos dos três corpos de prova (Figura 12, 13 e 14).

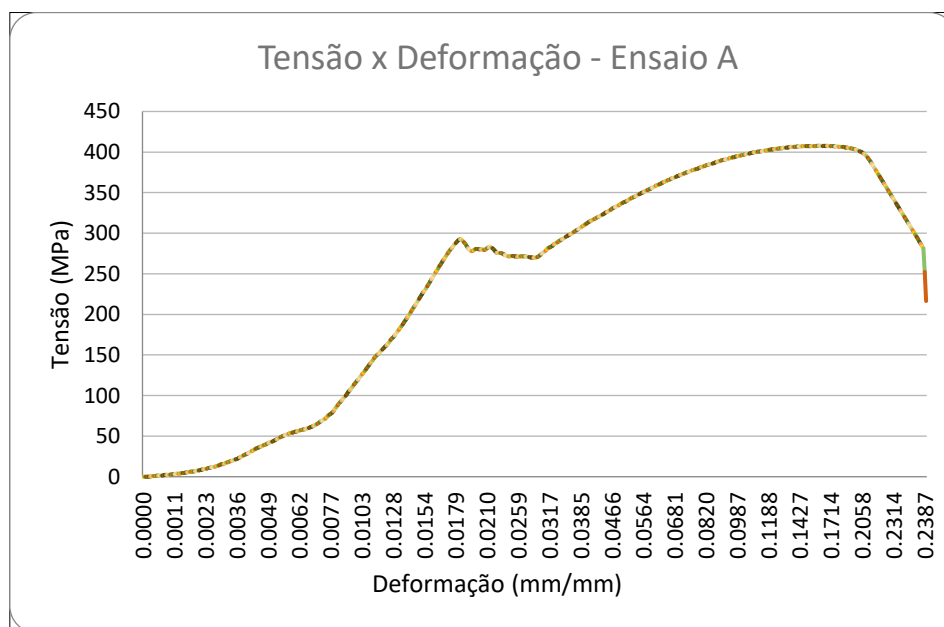


Figura 12: Curva tensão x deformação – Ensaio A

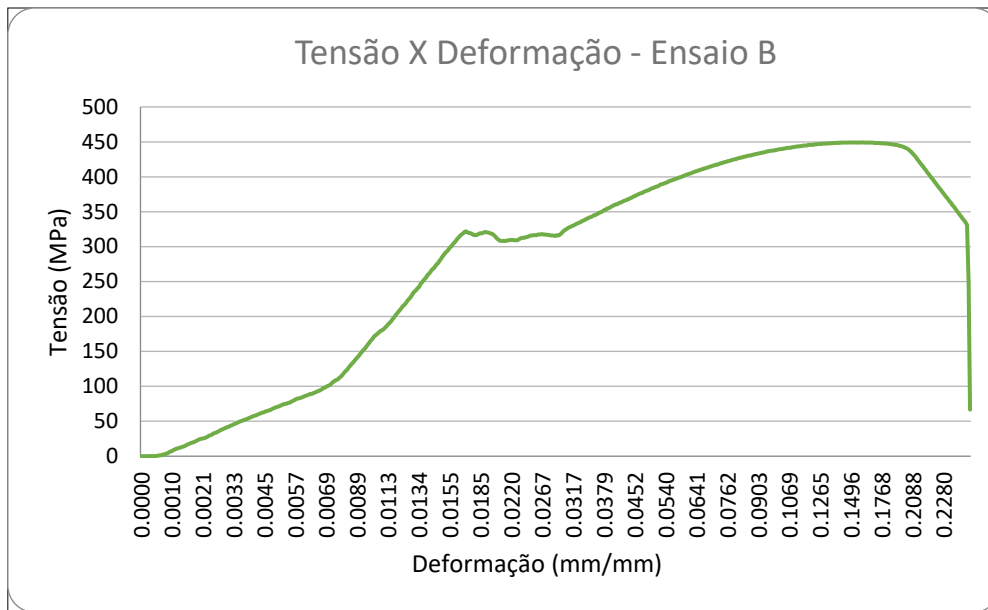


Figura 13: Curva de tensão x deformação – Ensaio B

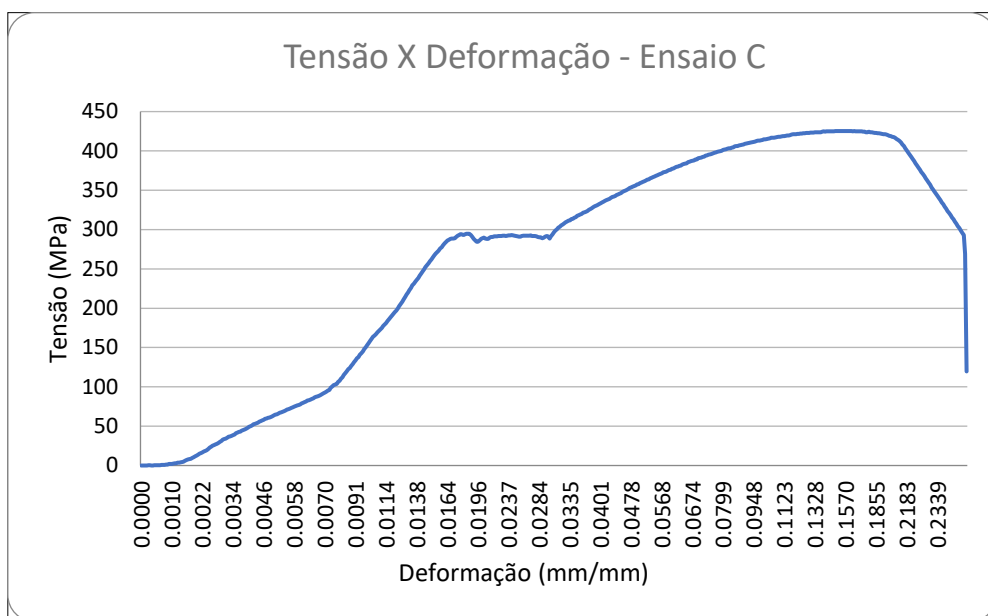


Figura 14: Curva de tensão x deformação – Ensaio C

Os três corpos de prova apresentaram uma curva tensão-deformação muito característica do material de aço, e mesmo com tensões muito próximas umas das outras, independente da temperatura enfrentada ou modo de resfriamento.

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DE TRAÇÃO

Na análise da tensão obtida na modelagem, verificou-se que a tensão última de 428 MPa foi atingida, na região da menor seção, conforme visto na Figura 15.

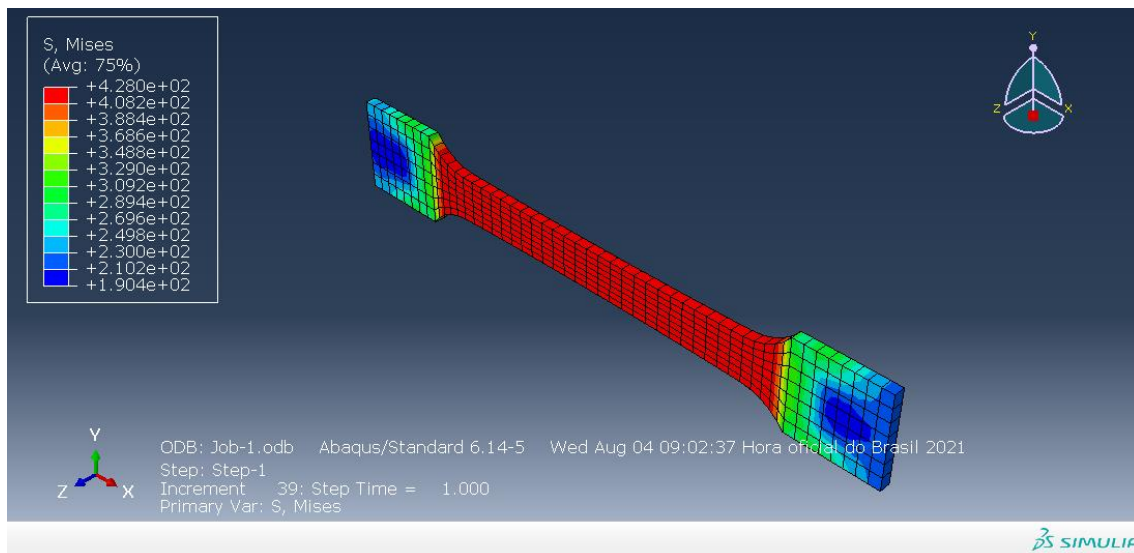


Figura 15: Resultados obtidos

Comparando com o resultado obtido em laboratório, verificou-se que o modelo chegou à mesma tensão última. Com esse resultado, foi possível concluir que o modelo foi validado.

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE TEMPERATURA

Como foi uma análise térmica simples, com todo o elemento exposto às altas temperaturas, obteve-se uma variação de temperatura mínima, com máxima temperatura nodal de 144 °C nas mesas e 141,9 °C na alma (Figura 16).

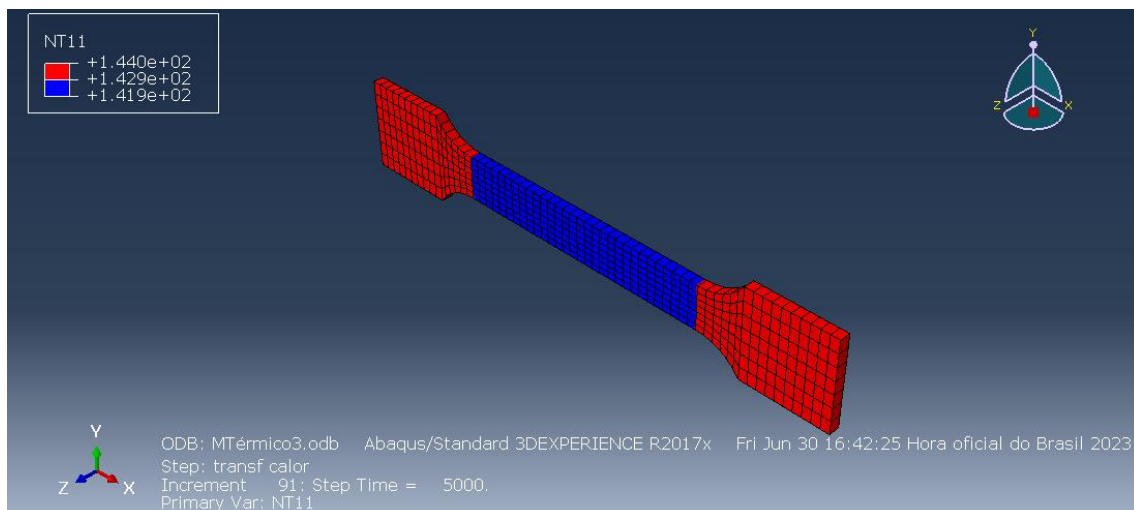


Figura 16: Resultados da temperatura nodal do modelo térmico

Na Figura 17, por sua vez, é possível verificar os resultados do vetor do fluxo de calor do modelo térmico obtido numericamente.

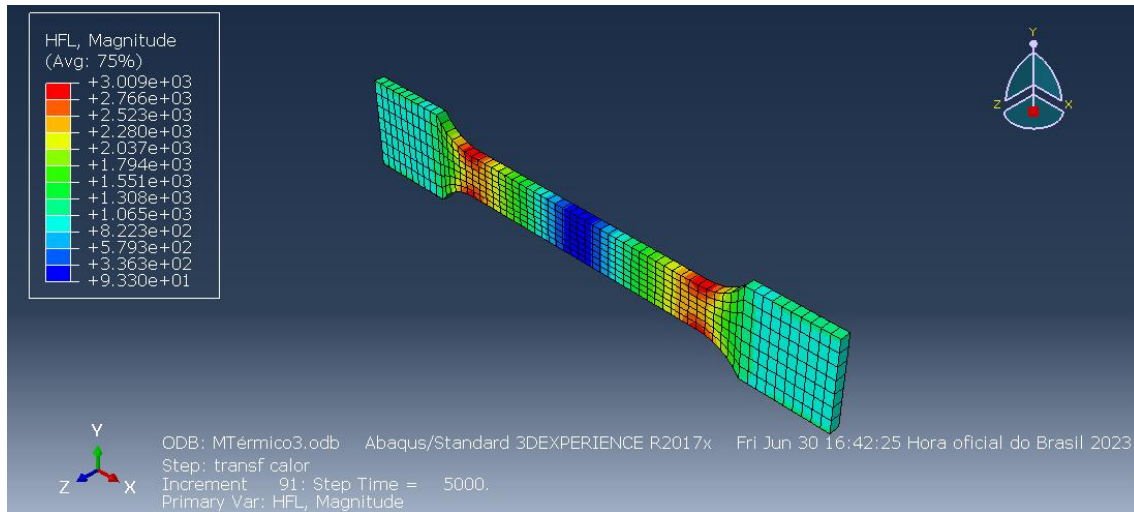


Figura 17: Resultados do vetor do fluxo de calor do modelo térmico

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA DE TRAÇÃO E TEMPERATURA

Os resultados de tensão obtidos (Figura 18) mostram que o modelo resistiu à uma tensão máxima de 383,4 MPa na alma do corpo de prova e também que os valores encontrados foram coerentes, uma vez que o modelo apresenta uma maior tensão no centro do corpo de prova, na região de menor área. Já verificando os resultados do deslocamento (Figura 19), observa-se que o modelo atingiu um deslocamento máximo igual a 20,96 mm e que os valores de deslocamento foram compatíveis, uma vez que apresenta deformação nula na região do engaste e uma deformação gradativa ao longo do modelo em direção ao sentido da força aplicada.

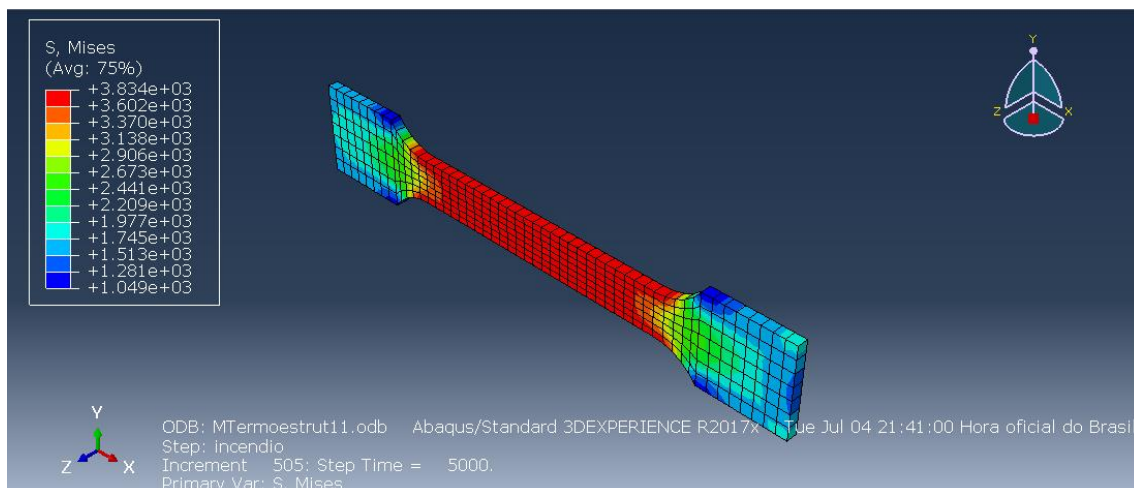


Figura 18: Resultados da tensão do modelo termo estrutural

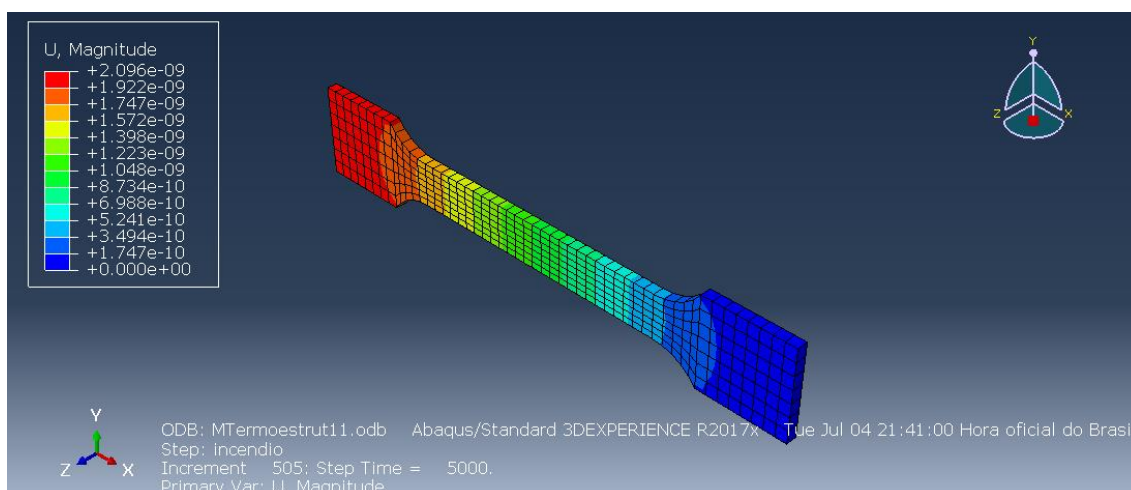


Figura 19: Resultados da deformação do modelo termo estrutural

5 Conclusões

Sabe-se que estruturas de aço sob efeito do aumento da temperatura apresentam redução do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento. No entanto, quão afetadas são essas propriedades e a que temperatura? Essa questão delineou o objetivo deste trabalho, que consistiu em contribuir para o entendimento acadêmico das alterações nas propriedades do material do aço sob a influência de altas temperaturas.

Após a análise dos resultados obtidos experimentalmente, comparando o gráfico do corpo de prova do ensaio A (sem aquecimento) com os gráficos dos corpos de prova dos ensaios B e C (aquecido e resfriado à temperatura ambiente e por submersão, respectivamente), foi possível concluir que o aço, quando aquecido à temperatura de 350°C, sem a aplicação de tração simultaneamente ao aumento da temperatura, apresenta uma variação desprezível no seu comportamento. Já analisando-se os resultados obtidos numericamente, verificou-se que no modelo termo estrutural o corpo de prova atingiu uma tensão máxima de 383,4 MPa, ou seja, um valor de tensão menor que o encontrado na simulação apenas de tração que correspondeu a 428 MPa. Além disso, comparando os resultados de deslocamento, conclui-se que o modelo atingiu um deslocamento máximo igual a 20,96 mm, ou seja, um valor ligeiramente inferior ao deslocamento máximo encontrado nos ensaios experimentais de 23,83 mm.

A maior limitação enfrentada foi a incapacidade estrutural do laboratório de realizar os ensaios de aquecimento e tração simultaneamente. Apesar dessa dificuldade,

este trabalho trouxe como principais contribuições resultados das propriedades do material aço SAE 1020 obtidos empiricamente através de ensaios experimentais executados em laboratório, além de um passo-a-passo para a realização de modelagens de tração e de temperatura no software ABAQUS, com o intuito de auxiliar outros pesquisadores que utilizem este programa para suas análises numéricas.

Por fim, neste trabalho, foram atingidos os objetivos de realizar uma simulação numérica e experimental do ensaio de tração, encontrar um modelo numérico válido, que obtivesse resultados condizentes com o fenômeno, e realizar um estudo numérico do ensaio de tração simultaneamente ao aumento da temperatura. Assim, com o modelo de tração calibrado a partir dos dados experimentais e um modelo numérico em que foi possível analisar o efeito da temperatura, sugere-se o aperfeiçoamento do trabalho desenvolvendo-se um estudo experimental em que seja possível analisar o carregamento e a temperatura simultaneamente, de modo que se possa comparar os resultados numéricos e experimentais.

6 Referências

ABNT. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 2001. 2

ABNT. **NBR 14323**: Projeto de Revisão da NBR 14323 - Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 2013.

FERNANDES, Danilo de Hollanda. Análise Não-Linear Elástica de Pórticos Planos em Aço sob Ação de Incêndio. Rio de Janeiro, 2004

IPQ. **NP EN 1993-1-2**: Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço. Parte 1-2: Regras gerais. Verificação da resistência ao fogo. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2010. 2, 3

MARTINS, M. M. Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte - MG. 2000.

SILVA, V. P. Estruturas de aço em situação de incêndio. Zigurate Editora. São Paulo - SP. 2001.

ZHAO, J. C. e SHEN, Z. Y. Experimental Studies of the Behaviour of Unprotected Steel Frames in Fire. Journal of Construction Steel Research 50. p137-150. Elsevier Science Publishers Ltd. London - UK. 1999