

**Obtenção numérica do perfil térmico durante passagem de fonte de calor nos materiais
AISI 410, 304L e 430**

**Numerical obtaining of the thermal profile during the passage of the heat source in the
materials AISI 410, 304L and 430**

**Obtención numérica del perfil térmico durante el paso de la fuente de calor en
materiales AISI 410, 304L y 430**

Recebido: 23/04/2020 | Revisado: 24/04/2020 | Aceito: 25/04/2020 | Publicado: 28/04/2020

Rafael Leandro Fernandes Melo

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4422-2206>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: rafael.melo@ifce.edu.br

Allan da Silva Maia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7105-8846>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: allanmaia@ifce.edu.br

Dehon da Rocha Junior

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5279-8558>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: dehon.junior@ifce.edu.br

Alessandro Jacinto Rodrigues Carvalho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2469-8231>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: alessandro.carvalho@ifce.edu.br

Fernanda Monique da Silva

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1264-0932>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: fernanda.monique@ifce.edu.br

Paulo Ricardo Queiroz

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-9242>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: pauloricardo.eq@hotmail.com

Isabel Cristina da C3sta Souza

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3510-1875>

Secretaria do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: bel.cris@outlook.com

Resumo

O m3todo de elementos finitos 3 uma an3lise num3rica capaz de responder diversos problemas transientes, n3o lineares da engenharia. O objetivo desse trabalho foi realizar uma pesquisa experimental de an3lise num3rica via elementos finitos, em busca da resposta a um aporte t3rmico em tr3s materiais inoxid3veis, sendo eles AISI 410, AISI 304L e AISI 430. Para isso foi utilizado o *software* Ansys[®] Academic 2020 R1, nele foram modeladas chapas nas dimens3es de **150x200x2 mm**, com um caminho de passagem da fonte de calor de **180 mm**. Os materiais foram criados com suas propriedades f3sicas transiente. A fonte de calor adotada foi a Gaussiana, retirada de uma extens3o matem3tica pr3pria para o *software*. Foram consideradas as perdas de calor por condu33o na pe3a, convec33o e radia33o no ambiente. A constru33o do perfil de temperatura de cada material foi constru3da de acordo com a temperatura m3xima atingida, temperatura em pontos espec3ficos e m3ximo fluxo de temperatura. Os dados dos perfis de temperatura dos materiais foram comparados utilizando por an3lise estat3stica ANOVA, utilizando o teste de *Tukey*. Os resultados mostraram a possibilidade de realizar simula33o de processos de soldagem com as condi33es de contorno adotadas, mostraram que n3o h3 uma diferen3a de m3xima temperatura entre os tr3s materiais, entretanto existe uma diferen3a significativa entre os m3ximos fluxos de temperatura obtidos entre os tr3s m3terias, fato justificado pelas suas diferen3as de propriedades f3sicas. Al3m disso, os dados de perfil t3rmico permitem an3lises estruturais dos materiais, bem como predi33es de caminhos a seguir em ajuste de par3metros experimentais.

Palavras-chave: Elementos finitos; Perfil t3rmico; A3os inoxid3veis.

Abstract

The finite element method is a numerical analysis capable of answering several transient, non-linear engineering problems. The objective of this work was to carry out an experimental research of numerical analysis via finite elements, in search of the answer to a thermal input in three stainless materials, namely AISI 410, AISI 304L and AISI 430. For this, the software Ansys[®] Academic 2020 was used. R1, plates were modeled in the dimensions of 150x200x2

mm, with a passage path for the heat source of 180 mm. The materials were created with their transient physical properties. The heat source adopted was Gaussian, taken from a mathematical extension for the software. Heat losses due to conduction in the part, convection and radiation in the environment were considered. The construction of the temperature profile of each material was built according to the maximum temperature reached, temperature at specific points and maximum temperature flow. The data of the material temperature profiles were compared using ANOVA statistical analysis, using the Tukey test. The results showed the possibility of carrying out simulation of welding processes with the adopted boundary conditions, showed that there is no difference in maximum temperature between the three materials, however there is a significant difference between the maximum temperature flows obtained between the three materials, fact justified by their differences in physical properties. In addition, the thermal profile data allows structural analysis of the materials, as well as predictions of paths to follow in adjusting experimental parameters.

Keywords: Finite elements; Thermal profile; Stainless steels.

Resumen

El método de elementos finitos es un análisis numérico capaz de responder a varios problemas de ingeniería transitorios y no lineales. El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo una investigación experimental de análisis numérico a través de elementos finitos, en busca de la respuesta a una entrada térmica en tres materiales inoxidables, a saber, AISI 410, AISI 304L y AISI 430. Para esto, se utilizó el software Ansys® Academic 2020. R1, las placas se modelaron en las dimensiones de 150x200x2 mm, con una trayectoria de paso para la fuente de calor de 180 mm. Los materiales fueron creados con sus propiedades físicas transitorias. La fuente de calor adoptada fue gaussiana, tomada de una extensión matemática para el software. Se consideraron las pérdidas de calor debido a la conducción en la parte, la convección y la radiación en el medio ambiente. La construcción del perfil de temperatura de cada material se construyó de acuerdo con la temperatura máxima alcanzada, la temperatura en puntos específicos y el flujo de temperatura máxima. Los datos de los perfiles de temperatura del material se compararon mediante el análisis estadístico ANOVA, utilizando la prueba de Tukey. Los resultados mostraron la posibilidad de llevar a cabo la simulación de procesos de soldadura con las condiciones de contorno adoptadas, mostraron que no hay diferencia en la temperatura máxima entre los tres materiales, sin embargo, hay una diferencia significativa entre los flujos de temperatura máxima obtenidos entre los tres materiales. hecho justificado por sus diferencias en las propiedades físicas. Además, los datos del perfil térmico

permiten el análisis estructural de los materiales, así como las predicciones de los caminos a seguir para ajustar los parámetros experimentales.

Palabras clave: Elementos finitos; Perfil térmico; Aceros inoxidables.

1. Introdução

As análises numéricas já possuem seu papel muito bem consolidado nas ciências e nas engenharias (Alves Filho, 2018). Diversas são as modelagens matemáticas empregadas nas ciências, utilizando conceitos da física da matéria condensada que saem desde modelagens quânticas como a Teoria da Densidade Funcional a modelagens mais clássicas como Dinâmica Molecular (Morgon & Custodio, 1995; Marques, 2012). Nas engenharias as modelagens a nível de partícula veem ganhando força, entretanto métodos macroestruturais já possuem um caminho muito bem investigado e validado experimentalmente, como por exemplo a utilização de métodos de elementos finitos e volumes finitos, para resolução de problemas fluidodinâmicos, análises térmicas e estruturais (Song, Tat & Natarajan, 2018; Malekan et al., 2019).

Os métodos de elementos finitos, conseguem responder problemas muitas vezes não respondidos por métodos experimentais. Sendo utilizados desde obtenção de escoamento de fluidos, campos de temperatura, geração de tensões residuais, deformações em materiais, entre outras (Almeida, 2012; Gomes, 2013; Ribeiro & Romero 2019; Stoppe & Santos, 2020). Nesse sentido, os métodos numéricos conseguem simular aplicações de funcionamento de bombas hidráulicas, motores de combustão, processos de soldagem bem como deformações causadas por esses processos (Almeida, 2012; Gomes, 2013; Mantegazini & Romero 2019).

Existem diversas formas de união de materiais por processos de soldagem, que podem deferir pelo tipo de material, sua espessura, bem como a característica que o operador quer obter, sem haver uma deformação causada pelo aporte térmico (Song et al., 2018). Nas análises numéricas, em particular elementos finitos, as condições de contorno são os parâmetros iniciais que irão simular o processo numérico com os processos experimentais. Em um processo experimental o perfil do cordão de solda formado é influenciado pelas condições de velocidade, tensão e corrente, dando assim um aporte térmico específico. No processo numérico essas condições devem ser modeladas no perfil da fonte de calor proporcionada (Goldak, 2005).

No decorrer da evolução de elementos finitos para simular processos de soldagem, ou até mesmo injeção de aporte térmico em um material, diversas foram as geometrias que

surgiram, até chegar a geometria que melhor se convergiu com resultados experimentais, sendo a dupla elipsoide de Goldak (2005) utilizando o perfil de uma Gaussiana volumétrica.

Embora o perfil da Gaussiana seja parametrizado numericamente, procurando-se um aporte térmico específico, esse pode se comportar de diferentes maneiras de acordo com o material escolhido na simulação (Zhu & Chao, 2002). Materiais com diferentes propriedades físicas que são transientes e não se comportando de forma linear, podem gerar espalhamento do fluxo de temperatura com geometrias bastantes distintas. Essas geometrias por sua vez, geram diferentes perfis térmicos que promovem diferentes mudanças estruturais e microestruturais no material (Venkateswarlu et al., 2018).

Na literatura, existe uma alta periodicidade de materiais sendo pesquisado em aporte térmico, simulando um processo de soldagem e influencias estruturais que esse aporte térmico gera (He et al., 2014). Os aços inoxidáveis por sua vez possuem uma alta visibilidade pelos pesquisadores, já que são materiais muito utilizados na indústria (Askeland, 2019).

Dentre os aços inoxidáveis, possuímos a classificação de aços ferríticos, auteníticos, martensíticos, endurecidos por precipitação e duplex, cada um com suas aplicações específicas graças as suas propriedades distintas (Askeland, 2019). Conhecer o comportamento de cada material em uma condição de trabalho particular é essencial para decidir qual a melhor aplicação, bem como sua resposta.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi realizar uma pesquisa experimental de análise numérica via elementos finitos, em busca da resposta a um aporte térmico em três materiais inoxidáveis, sendo eles AISI 410, AISI 304L e AISI 430. Como justificativa, a pesquisa gera dados para uma biblioteca de escolha de materiais, para uma determinada aplicação experimental. Além de fornecer dados a pesquisas futuras para identificação de deformação do material.

2. Metodologia

O trabalho consiste em uma pesquisa experimental de análise numérica de dados com enfoque computacional, sendo ela quantitativa de acordo com conceitos fundamentais da metodologia de pesquisa científica (Shitsuka et al., 2005; Pereira et al., 2018).

Foi realizada uma modelagem numérica de uma fonte de calor nos aços inoxidáveis AISI 410, AISI 304L e AISI 430, com a finalidade de encontrar os valores de temperatura máxima no material, pontos específicos de temperatura e fluxo de temperatura máxima, criando assim um perfil térmico de como cada material se comporta. O comportamento

térmico de cada material foi comparado estatisticamente, a fim de identificar relevâncias em cada perfil.

Todo o processo foi modelado no *software* de elementos finitos Ansys® *Academic* 2020 R1. As condições de contorno utilizadas foram: condução transiente de temperatura, fluxo de calor com geometria Gaussiana (modelo matemático utilizado com extensão no Ansys® *Academic* 2020 R1), variação não linear das propriedades físicas (densidade, condutividade térmica e calor específico) e perda de temperatura por convecção e radiação para o ambiente. Outras condições ajustadas foram a geometria do material, e ajuste de convergência de malha.

O modelo matemático da condução de calor transiente obedeceu ao modelo para sólidos, como mostra a Equação 1.

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(T)\frac{\partial T}{\partial t}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(T)\frac{\partial T}{\partial t}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z(T)\frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (1)$$

onde;

ρ = é a densidade (kg/mm^3);

c = calor específico ($\text{m. J}/\text{kg. K}$);

Q = entrada de calor (W);

(K_x, K_y, K_z) = são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções ($W/m.K$);

T = temperatura (K);

t = tempo (s).

Já o modelo matemático da fonte de calor inserido nos materiais foi a Gaussiana ajustada de acordo com a Equação 2.

$$q = C_2 e^{-\frac{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2]}{C_1^2}} \quad (2)$$

onde;

q = fluxo de calor (W/mm^{-2});

C_1 = raio do feixe de energia (mm);

C_2 = intensidade de energia da fonte (W/mm^{-2});

(x_o, y_o, z_o) = posições instantâneas do fluxo de calor, utilizando a distância de acordo com os valores de velocidade e tempo (mm).

Os parâmetros ajustados foram $C_1 = -5$ mm e $C_2 = 50000$ W/mm^{-2} .

Os CAD (*Computer Aided Design*) foram criados no próprio Ansys® *Academic* 2020 R1 com o pacote DM (*Geometry in DesignModeler*), esses consistiram de chapas metálicas de cada material proposto. Essas chapas tiveram as dimensões de **150x200x2 mm**, o caminho de passagem do fluxo de calor foi de **180 mm**. A velocidade de passagem do fluxo foi de **18 mm/s** gerando um tempo de passagem de **10 s**.

Os materiais foram criados na própria biblioteca do *software*, com suas propriedades físicas de densidade, condutividade térmica e calor específico, variando com a temperatura, levando a uma análise não linear, para assim obedecer as Equações 1 e 2. A Tabela 1 mostra as propriedades relevantes dos materiais, para o início da simulação em temperatura inicial de **298,15 K**.

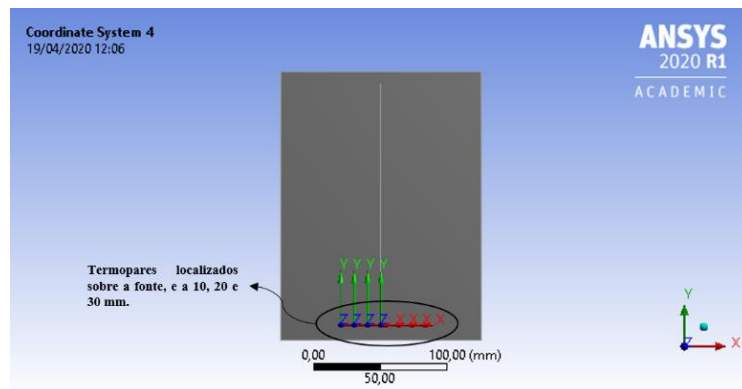
Tabela 1. Propriedades físicas dos materiais AISI 410, AISI 304L e AISI 430.

Materiais/Propriedades físicas	AISI 410	AISI 304L	AISI 430
Densidade (kg/mm^3)	$7,75e^{-6}$	$7,9e^{-6}$	$7,72e^{-6}$
Condutividade Térmica ($W/mm.K$)	0,0249	0,015	0,0249
Calor específico ($m.J/kg.K$)	$4,74e^5$	$5,1e^5$	$4,88e^5$

Fonte: Ansys® *Academic* 2020 R1.

Para obtenção do comportamento térmico de cada material, foi medido a evolução da temperatura máxima, temperaturas pontuais (probes) na geometria do material, além de fluxo de máxima temperatura no material, todos dados importantes para uma futura construção de deformações formadas na peça. A temperatura máxima e fluxo de temperatura máxima foi medida em toda a peça, já os probes de temperatura foram no centro de passagem do fluxo e a **10, 20 e 30 mm** deste, como é representado na Figura 1.

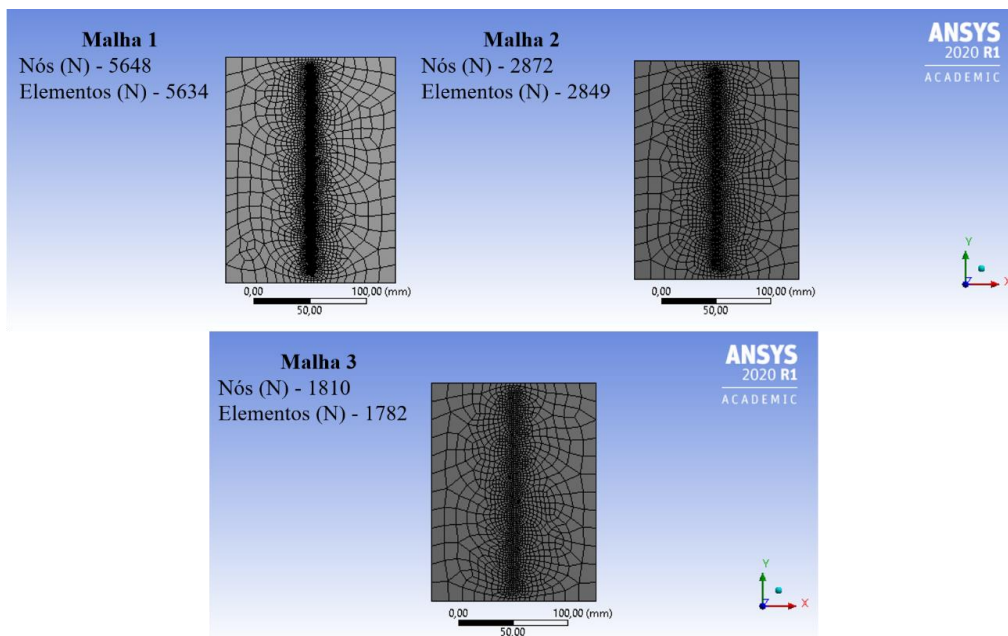
Figura 1. Representação dos pontos medições de temperatura.



Fonte: Autor.

Antes da obtenção dos resultados finais, foram realizados ajustes de malhas a fim de encontrar convergências de resultados, de acordo com o poder computacional disponível (8 núcleos de processamento, 8 gigabytes de memória, 2 gigabytes placa de vídeo). Após a convergência de resultados foram selecionadas as três melhores malhas, essas foram necessárias para análises estatísticas entre os três materiais. As três malhas são mostradas na Figura 2, com seus respectivos números de nós e elementos. Todas tiveram refinamento no local de passagem do fluxo de calor e todas tiveram seus elementos com configurações tetragonais.

Figura 2. Malhas com resultados em convergência. Utilizadas para análise estatística dos resultados de temperatura e fluxo de temperatura.



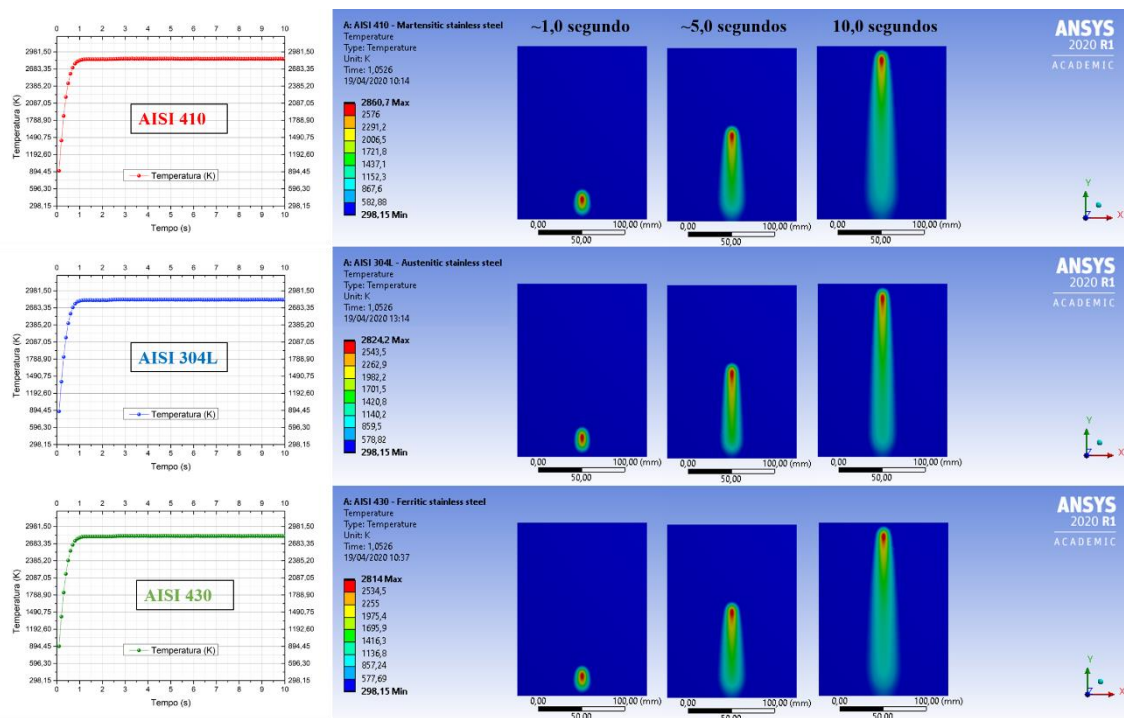
Fonte: Autor.

Foi realizada uma análise estatística onde levou-se em consideração os valores obtidos entre as três malhas, para possível comparação entre os três materiais. Foi utilizado a análise de variância ANOVA, com o teste de múltiplas comparações de Tukey, sendo valores $p < 0,05$ estatisticamente diferentes.

3. Resultados e Discussão

Com as condições de contorno utilizadas, foi possível realizar o deslocamento da fonte de calor nos três materiais, como exposto na Figura 3. Foi mostrado a eficiência de análise não linear de condução de temperatura utilizando o método de elementos finitos, técnica empregada por diversos autores para previsão computacional do campo de temperatura em diferentes processos, como exemplo aplicações de processo de soldagem (Danis et al., 2013; Flint et al., 2017; He et al., 2014; Nart & Celik, 2013; Venkateswarlu et al., 2018).

Figura 3. Evolução de temperatura máxima e deslocamento da fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

A Figura 3, mostra além do deslocamento da fonte de calor, a máxima temperatura atingida em cada material, utilizando a malha mais refinada da metodologia (malha 1).

Percebemos uma grande semelhança entre a evolução de temperatura e o perfil da Gaussiana gerada entre todos os materiais.

No que diz respeito a evolução de temperatura, o AISI 410 teve sua temperatura máxima de **2860,7 K** se tornando constante em aproximadamente **1 s**, o AISI 304L obteve **2824,2 K** e o AISI 430 teve **2814,0 K** ambos se tornando constante também em aproximadamente **1 s**.

Os aços AISI 410, 304L e 430 são martensíticos, autênticos e ferríticos, respectivamente. Com a temperatura máxima alcançada na simulação, todos passariam por processos de transformação microestrutural com mudanças microestruturais dependentes do tempo de resfriamento, condição não avaliada nesse artigo (Lippold & Kotecki, 2005; Lai JKL et al., 2012). Em um cenário de simulação para aplicação em processos de soldagem, cada material possuiria particularidades de operação para não perder suas características, logo a temperatura alcançada e a velocidade de resfriamento igual para todos gerariam prejuízos de propriedades primárias de aplicação (Zhu & Chao, 2002). Entretanto, como uma das finalidades desse trabalho é realizar uma comparação térmica, optou-se por utilizar o mesmo aporte térmico.

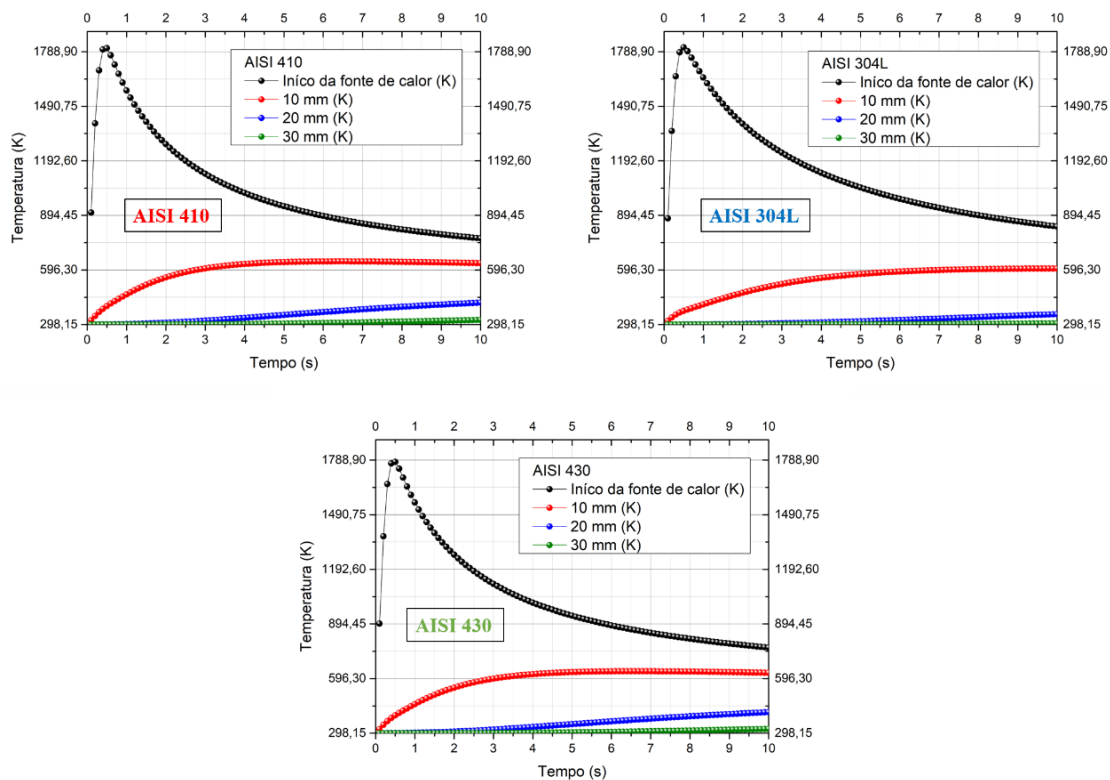
O perfil da Gaussiana formada nos três materiais influencia diretamente na formação da Zona Termicamente Afetada (ZAC) (Kubiak & Vaško, 2017), que por sua vez também proporciona mudanças microestruturais nos materiais (Nunes et al., 2011). Em uma comparação entre os três materiais, percebemos uma sutil diferença na distribuição de temperatura, entretanto para uma análise mais aprofundada seria necessária uma visualização de *pixel* de coloração, juntamente com uma análise estatística $p < 0,05$ para assim poder afirmar que não houve distribuição relevante de temperatura na geometria do material. É interessante salientar que pequenas diferenças na ZAC podem acarretar em diferentes pontos de fragilização de material, devido mudanças de geometria do grão, sendo propriedades físicas do material como a condutividade térmica diretamente influente nessas mudanças (Singh et al., 2020).

Os gráficos contidos na Figura 4 remetem os pontos de medição de temperatura, como foi mostrado na Figura 1. É avaliada a evolução de temperatura no início da formação da fonte de calor e a **10, 20 e 30 mm** de cada material estudado, informações bastante complicadas de serem obtidas experimentalmente, já que para medir a temperatura no momento exato da formação de uma fonte de calor, haveria necessidade de um termopar que suportasse diretamente essa energia sem que fundisse junto com o material. Os termopares

dispostos a **10, 20 e 30 mm** deveriam ter qualidade suficiente para não danificarem durante o processo. Sendo assim a análise numérica mostra-se bastante importante para o desenvolvimento das ciências térmicas (Ooi et al., 2014; Zhou et al., 2020).

A medida de temperatura no início da fonte de calor é fundamental para avaliar se o material entrou em fusão no início da análise numérica, questão importante para análise de um processo de soldagem, já que a fusão inicial é necessária. As medidas a **10, 20 e 30 mm** da passagem da fonte de calor, são dados que podem se tornar bastante útil para avaliação da ZAC e uma possível avaliação de deformação do material.

Figura 4. Evolução da temperatura, em cada material estudado, na fonte de calor e a 10, 20 e 30 mm.



Fonte: Autor.

Todos os três materiais estudados conseguiram entrar em processo de fusão no início da fonte de calor. O AISI 410 teve sua temperatura inicial máxima na fonte de calor atingida em **0,5 s** com **1808,2 K**, o AISI 304L obteve **1812,6 K** e o AISI 430 **1779,1 K**, ambos também a **0,5 s**. É importante se observar a velocidade de resfriamento, condição importante na formação de microestruturas (Nunes et al., 2012), bem como na geração de tensões

residuais e deformação do material (Flint et al., 2017; He et al., 2014; Venkateswarlu et al., 2018). O AISI 410 ao final dos **10 s**, que foi o tempo de soldagem, teve a temperatura marcada no início da fonte de calor resfriada para **768,93 K**, ou seja, tendo uma taxa de resfriamento de aproximadamente **109,36 K/s**, o AISI 304L resfriou para **833,79 K** com uma taxa de resfriamento de **103,03 K/s** e o AISI 430 obteve **765,13 K** com **106,77 K/s**, sendo esses valores bem vindos em uma análise numérica, já que se mostram nada triviais de se obter experimentalmente.

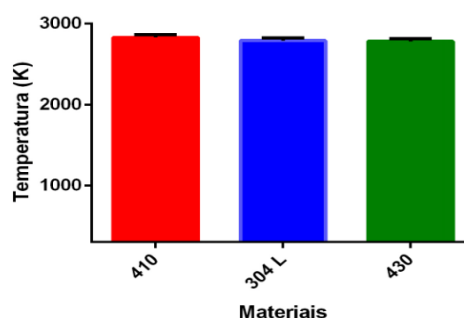
A temperatura medida a **10 mm** da fonte de calor no AISI 410 chegou à temperatura máxima de **643 K** no tempo de **6,4 s** ao final dos **10 s** se resfriou para **633,5 K**, no AISI 304L a temperatura a **10 mm** não chegou em sua taxa nominal ainda tendo tendência de crescimento, embora mínimo, em **10 s** de passagem da fonte chegou a temperatura de **603,99 K**, o AISI 430 obteve **636,12 K** em **6,6 s** resfriando para **628,03 K** ao final dos **10 s**.

As temperaturas medidas a **20 mm** e **30 mm** nos três materiais obtiveram pequenas variações de temperatura, como mostrado nos gráficos, os materiais AISI 410 e 430 tiveram o crescimento de temperatura, para **417,64 K** e **323,26 K**, e **412,84 K** e **321,56 K**, respectivamente, ao final dos **10 s**. O AISI 304L chegou a **354,52 K** e **303,97 K**.

Os dados mostrados podem apresentar uma pequena diferença entre todos os materiais, entretanto uma maior diferença do AISI 304L quando comparado com os AISI 410 e 430, fator que pode ser devido as maiores diferenças de condutividade térmica e calor específico do AISI 304L (Tabela 1).

A Figura 5 mostra uma análise estatística da variação de temperatura dos três materiais, utilizando as três melhores malhas de convergência de resultados (Figura 2).

Figura 5. Análise estatística da variação térmica máx. para o AISI 410, 304L e 430.

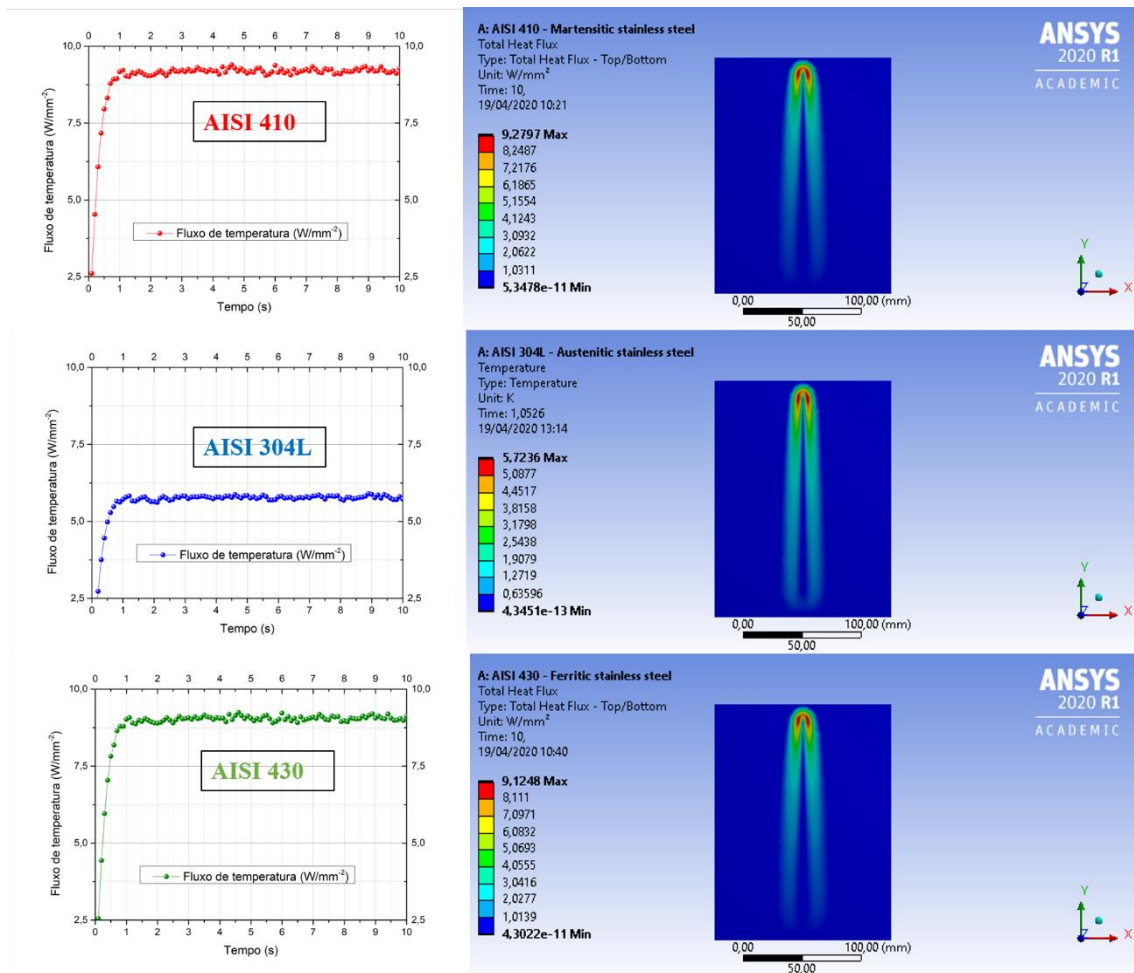


Fonte: Autor.

Na análise, pela Figura 5, mostrou-se que não houve uma diferença significativa para $p < 0,05$, mostrando que as pequenas variações do AISI 304L não se mostra relevante para essas condições.

A Figura 6 mostra o fluxo de temperatura máximo alcançado em cada material e o perfil formado por esse fluxo durante a passagem da fonte de calor. A obtenção desse fluxo de temperatura, juntamente com a temperatura máxima e as temperaturas pontuais, é extremamente importante em uma obtenção de um perfil térmico, que por sua vez possibilita estudos de propriedades estruturais como deformações máxima, deformações direcionais, equivalência de von Mises, entre outras (Ueda et al., 2012).

Figura 6. Evolução de fluxo máximo de temperatura e perfil desse fluxo durante o deslocamento da fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

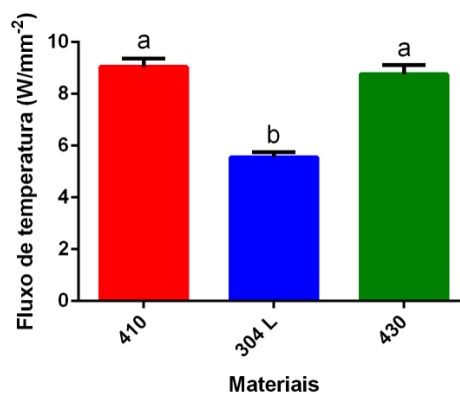
No que diz respeito ao fluxo de temperatura máximo, a Figura 6 mostra uma relevante diferença entre os materiais AISI 410 e 430 com o AISI 304L. Todos obtiveram seus fluxos

máximos alcançados em 1,1 s com o AISI 410, 430 e 304L em 9,2168 W/mm², 9,0736 W/mm² e 5,8271 W/mm², respectivamente. No perfil do fluxo, durante a passagem da fonte de calor, também conseguimos perceber uma diferença, notamos pela coloração que o AISI 304L possui um espalhamento mais lento, sendo ainda mais estreito que os outros materiais, para uma melhor discussão nesse sentido, haveria necessidade de uma investigação por *pixel* de coloração.

As diferenças de comportamento entre materiais, principalmente entre os AISI 410 e 430 com o AISI 304L, pode ser justificada pela Tabela 1, em que as propriedades térmicas do material autêntico são diferentes dos materiais ferríticos e martensíticos. Sendo assim, em uma situação experimental, esperaríamos maiores mudanças microestruturais desse material, quando comparado com os materiais ferríticos e martensíticos, fato coerente com a literatura (Potter et al., 2009; Askeland et al., 2019).

A Figura 7 mostra uma análise estatística da variação do fluxo de temperatura dos três materiais, utilizando as três melhores malhas de convergência de resultados (Figura 2). Na análise foi mostrado que houve uma diferença significativa para $p < 0,05$, do AISI 304L com os AISI 410 e 430.

Figura 7. Análise estatística da variação do fluxo de temperatura máximo para o AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

Em uma comparação da Figura 5 com a Figura 7, notamos que os fatores de condutividade térmica e capacidade térmica, são mais determinísticos em uma análise de fluxo de temperatura máxima do que de obtenção de temperatura máxima em pontos

específicos, sendo esse outro fator coerente com a literatura (Poter et al., 2009; Moran et al., 2012).

4. Considerações Finais

Embora tenha havido limitações do poder computacional disponível, o objetivo da pesquisa foi cumprido. A formação do perfil de temperatura foi possível com as condições de contorno utilizada. A fonte de calor modelada via Gaussiana, com uma extensão matemática adicionada no *software* de elementos finitos Ansys® *Academic* 2020 R1, mostrou-se coerente com uma possível simulação de processos de soldagem.

Na comparação do perfil de temperatura entre os três materiais utilizados, a máxima temperatura obtida não possuiu mudanças relevantes entre os três, com critério de estatístico de $p < 0,05$. Na comparação do fluxo máximo de temperatura o AISI 304L, possuiu mudança relevante entre os outros matérias, fato que pode ser justificado pelas diferenças de condutividade térmica e capacidade térmica diferente do aço inoxidável autêntico. Dessa forma, as diferenças entre o AISI 304L podem gerar caminhos de mudanças microestruturais.

Diante disso, esse trabalho tem como sugestões para pesquisas futuras, realizar análises estruturais dos materiais apresentados, bem como proporcionar a processos experimentais dados para ajuste de parâmetros. O trabalho permite ainda, utilizar da metodologia para estudar diferentes aços, bem como diferentes geometrias de material.

Referências

Almeida, D. F. F. D. (2012). *Determinação das tensões residuais e deformações resultantes do processo de soldadura TIG através do Método dos Elementos Finitos* (Doctoral dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia).

Alves Filho, A. (2018). *Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE*. Ed. Saraiva.

Ansys® *Academic* (2020). (Research Mechanical, 2020 R1). [Software]. Canonsburg City, PA, EUA. Retrieved 20 Maio, 2020, from <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>.

Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2019). *Ciência e Engenharia dos Materiais*. Ed. Cengage.

Bathe, K. J. (2006). *Finite element procedures*. Ed. Klaus-Jurgen Bathe.

Danis, M., Lacoste, E., & Danis, Y. (2013). Numerical definition of an equivalent GTAW heat source. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1241–1248.

Flint, T. F., Francis, J. A., Smith, M. C., & Balakrishnan, J. (2017). Extension of the double-ellipsoidal heat source model to narrow-groove and keyhole weld configurations. *Journal of Materials Processing Tech.*, 246, 123–135.

Goldak, A. J., (2005). *Computational welding mechanics*. Ed. Canada: Springer.

Gomes, H. C. (2013). *Método dos elementos finitos com fronteiras imersas aplicado a problemas de dinâmica dos fluidos e interação fluido-estrutura* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

He, X., Gu, F., & Ball, A. (2014). A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*, 65, 1–66.

Kubiak, M., & Vaško, M. (2017). Numerical estimation of the shape of weld and heat affected zone in laser-arc hybrid welded joints. *Procedia Engineering*, 177, 114–120.

Lai, J. K.L., Lo, K.H., Shek, C.H., (2012). *Stainless steel an introduction and their recent developments*. Ed. Brussels: Bentham Books.

Lippold, J.C., Kotecki, D.J., (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Ed. New Jersey.

Malekan, M., Khosravi, A., & Cimini, C. A. (2019). Deformation and fracture of cylindrical tubes under detonation loading: A review of numerical and experimental analyses. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 173, 114–132.

Mantegazini, I., & Romero, O. (2019). Analysis of the flow in horizontal injector wells with profile equalization completion. *Research, Society and Development*, 8(9), e50891327.

Marques, D. M. M. (2012). *Estudo do contato entre sólidos metálicos por meio de simulações de dinâmica molecular* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2012). *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. Ed. LTC.

Morgon, N. H., & Custodio, R. (1995). Teoria do funcional de densidade. *Química Nova*, 18(1), 44-55.

Nart, E., & Celik, Y. (2013). A practical approach for simulating submerged arc welding process using FE method. *JCSR*, 84, 62–71.

Nunes, E. B., Batista, H. J., Barreto, A. S., & Motta, M. F. (2012). Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável Duplex. *Soldagem & Inspeção*, 17, 114–122.

Nunes, E. B., Neco, F., Junior, A., Farias, J. P., Ferreira, H., Abreu, G., Silva, C. C., Motta, M. F. (2011). Efeito da Energia de Soldagem sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Zona Afetada pelo Calor de Juntas de Aço Inoxidável Duplex. *Soldagem & Inspeção*, 16(3), 223–231.

Ooi, S. W., Garnham, J. E., & Ramjaun, T. I. (2014). Review: Low transformation temperature weld filler for tensile residual stress reduction. *Journal of Materials & Design*, 56, 773–781.

Pereira, A.S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM.

Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2009). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Ed. CRC Press.

Ribeiro, H., & Romero, O. (2019). Study of fluid flow in pre drilled liners in producing horizontal wells. *Research, Society and Development*, 8(10), e248101362.

Shitsuka, R. (2005). *Sistema de informação: um enfoque computacional*. Rio de Janeiro. Ed. Ciência Moderna.

Singh, G., Saxena, R. K., Pandey, S. (2020). An examination of mechanical properties of dissimilar AISI 304 stainless steel and copper weldment obtained using GTAW. *Materials Today: Proceedings*, (xxxx).

Song, C., Tat, E., & Natarajan, S. (2018). A review of the scaled boundary finite element method for two-dimensional linear elastic fracture mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*, 187, 45–73.

Stoppe, A., Neto, J., & Santos, K. (2020). Development of a fixed bed solar dryer: experimental study and CFD simulation. *Research, Society and Development*, 9(3), e123932667.

Ueda, Y., Murakawa, H., & Ma, N. (2012). *Welding deformation and residual stress prevention*. Ed. Elsevier.

Venkateswarlu, K., Kumar, P. N., & Ravikumar, P. S. (2018). Finite Element Simulation of Temperature Distribution, Distortion and Residual Stresses of Dissimilar Welded Joints. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 11933–11940.

Zhou, H., Zhang, Q., Yi, B., & Wang, J. (2020). Hardness prediction based on microstructure evolution and residual stress evaluation during high tensile thick plate butt welding. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, 146–156.

Zhu, X. K., & Chao, Y. J. (2002). Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*, 80, 967–976.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rafael Leandro Fernandes Melo – 25%

Allan da Silva Maia – 15%

Dehon da Rocha Junior – 10%

Alessandro Jacinto Rodrigues Carvalho – 10%

Fernanda Monique da Silva – 10%

Paulo Ricardo Queiroz – 10%

Isabel Cristina da C3sta Souza – 20%