

Melo, RLF, Souza, ICC, Maia, AS, Silva, FM, Queiroz, PR, Rocha Jr., D, Carvalho, ACB, Fernandes, JPC, Lima, JFV & Queiroz, LPO. (2020). Numerical acquisition of the strain-deformation profile during the passage of heat source in AISI 410, 304L and 430 materials. *Research, Society and Development*, 9(7):1-22, e286974224.

**Aquisição numérica do perfil tensão deformação durante passagem de fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430**

**Numerical acquisition of the strain-deformation profile during the passage of heat source in AISI 410, 304L and 430 materials**

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

Recebido: 04/05/2020 | Revisado: 04/05/2020 | Aceito: 05/05/2020 | Publicado: 13/05/2020

**Rafael Leandro Fernandes Melo**

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

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [rafael.melo@ifce.edu.br](mailto:rafael.melo@ifce.edu.br)

**Isabel Cristina da Cósta Souza**

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

Secretaria do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [bel.cris@outlook.com](mailto:bel.cris@outlook.com)

**Allan da Silva Maia**

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

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [allanmaia@ifce.edu.br](mailto:allanmaia@ifce.edu.br)

**Fernanda Monique da Silva**

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

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [fernanda.monique@ifce.edu.br](mailto:fernanda.monique@ifce.edu.br)

**Paulo Ricardo Queiroz**

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

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [pauloricardo.eq@hotmail.com](mailto:pauloricardo.eq@hotmail.com)

**Dehon da Rocha Junior**

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

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [dehon.junior@ifce.edu.br](mailto:dehon.junior@ifce.edu.br)

**Anne Caroline Brito Carvalho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6305-6747>

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [annecbrito@outlook.com](mailto:annecbrito@outlook.com)

**João Paulo Costa Fernandes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-1979>

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [jpcostatkd@gmail.com](mailto:jpcostatkd@gmail.com)

**João Felipe Vieira Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5156-1233>

Universidade Federal do Paraná, Brasil

E-mail: [joaofelipe\\_12@hotmail.com](mailto:joaofelipe_12@hotmail.com)

**Luiz Paulo de Oliveira Queiroz**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1549-3875>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: [luiz.paulo@ifce.edu.br](mailto:luiz.paulo@ifce.edu.br)

## **Resumo**

As análises numéricas por elementos finitos já se mostraram eficazes em diversos problemas de engenharia. Esta pesquisa teve como objetivo aquistar numericamente, por meio de uma pesquisa experimental de análise numérica via elementos finitos, o perfil tensão deformação dos materiais AISI 310, 304L e 430, após terem sofrido um aporte térmico de passagem de fonte de calor. Foi utilizado o *software* Ansys® Academic 2020 R1, nele foram importados dados da literatura da geometria do material, malhas utilizadas, aporte térmico e propriedades térmicas. A partir daí os materiais foram ajustados para terem suas propriedades estruturais transientes. Gerando uma resposta estrutural de tensão deformação ao aporte térmico inserido. O perfil tensão deformação de cada material foi construído de acordo com a tensão máxima obtida, tensões pontuais na geometria do material, deformação máxima obtida e deformações pontuais. Os dados de tensão e deformação máxima foram comparados entre os materiais utilizando análise estatística ANOVA com teste *Tukey*. Os resultados mostraram a possibilidade de análise estrutural após carregamento térmico com as condições de contorno adotadas, apropriando o método de elementos finitos. O teste estatístico mostrou que os três

materiais estudados apresentaram diferenças significativas para tensão máxima e deformação máxima para  $p < 0,05$ . A tensão deformação dos matérias apresentaram perfis convergentes com a literatura experimental e numérica. A pesquisa mostra uma metodologia com possível continuidade, pesquisando a formação de microestruturas e/ou sendo empregada em outros materiais.

**Palavras-chave:** Elementos finitos; Perfil tensão deformação; Aços inoxidáveis.

### **Abstract**

Numerical analysis by finite elements has already proved effective in several engineering problems. This research aimed to acquire numerically, through an experimental research of numerical analysis via finite elements, the stress-strain profile of AISI 310, 304L and 430 materials, after having undergone a thermal input from the heat source. Ansys® Academic 2020 R1 software was used, it imported data from the literature of material geometry, meshes used, thermal input and thermal properties. Thereafter the materials were adjusted to have their transient structural properties. Generating a structural stress-deformation response to the inserted thermal input. The stress-strain profile of each material was constructed according to the maximum stress obtained, point stresses in the material geometry, maximum strain obtained and point deformations. The maximum stress and strain data were compared between the materials using ANOVA statistical analysis with Tukey test. The results showed the possibility of structural analysis after thermal loading with the adopted boundary conditions, using the finite element method. The statistical test showed that the three materials studied showed significant differences for maximum stress and maximum strain for  $p < 0.05$ . The strain strain of the materials presented profiles converging with the experimental and numerical literature. The research shows a methodology with possible continuity, researching the formation of microstructures and / or being used in other materials.

**Keywords:** Finite elements; Deformation stress profile; Stainless steels.

### **Resumen**

El análisis numérico por elementos finitos ya ha demostrado su eficacia en varios problemas de ingeniería. Esta investigación tuvo como objetivo adquirir numéricamente, a través de una investigación experimental de análisis numérico a través de elementos finitos, el perfil de tensión-deformación de los materiales AISI 310, 304L y 430, después de haber sufrido un aporte térmico de la fuente de calor. Se utilizó el software Ansys® Academic 2020 R1, importó datos de la literatura de geometría de materiales, mallas utilizadas, entrada térmica y

propiedades térmicas. Posteriormente, los materiales se ajustaron para tener sus propiedades estructurales transitorias. Generando una respuesta de deformación por esfuerzo estructural a la entrada térmica insertada. El perfil de tensión-deformación de cada material se construyó de acuerdo con la tensión máxima obtenida, las tensiones puntuales en la geometría del material, la deformación máxima obtenida y las deformaciones puntuales. Los datos de tensión y tensión máximas se compararon entre los materiales mediante el análisis estadístico ANOVA con la prueba de Tukey. Los resultados mostraron la posibilidad de un análisis estructural después de la carga térmica con las condiciones de contorno adoptadas, utilizando el método de elementos finitos. La prueba estadística mostró que los tres materiales estudiados mostraron diferencias significativas para la tensión máxima y la tensión máxima para  $p < 0.05$ . La deformación por deformación de los materiales presentó perfiles convergentes con la literatura experimental y numérica. La investigación muestra una metodología con posible continuidad, investigando la formación de microestructuras y / o siendo utilizada en otros materiales.

**Palabras clave:** Elementos finitos; Perfil de estrés por deformación; Aceros inoxidables.

## 1. Introdução

A engenharia busca a todo momento prever possíveis falhas de materiais (Atunes, 2009; Schijve, 2009; Norton, 2013). Projetos mecânicos e síntese materiais são reavaliados a cada evolução das ciências básicas como a física, a química e até mesmo a biologia, em aplicações biomédicas, biomecânicas e de biomateriais (Campoccia et al., 2013; Pires et al., 2015). A matemática sempre se mostrou como uma intermediária em uma linguagem universal (Ponte, 2019). O método de elementos finitos é uma prova disso (Madenci & Guven, 2015; Alves, 2018).

O método de elementos finitos, assim como diversas outras soluções matemáticas, é uma ferramenta numérica que permite prevê problemas de contorno (Lotti et al., 2006). A engenharia, por exemplo, utiliza desse método para solucionar problemas de diversas áreas como análises modais, dinâmicas de partículas, comportamento de fluidos, comportamentos térmicos bem como respostas estruturais de tensão deformação (Arregui-Mena et al., 2020).

As técnicas matemáticas e numéricas, respondem perguntas nada triviais de serem encontradas experimentalmente (Dehestani et al., 2020). Parâmetros de frequências naturais, aceleração e velocidade de partículas, escoamento turbulento de fluidos, bem como respostas estruturais a um aporte térmico, são perguntas muito bem respondidas em análises de

elementos finitos, com equacionamentos já validadas experimentalmente (Madenci & Guven, 2015). Visto isso, os elementos finitos conseguem simular condições de funcionamento de pontes, aerogeradores, turbinas, além de processos de soldagem, com seus perfis térmicos e estruturais (Lima & López-Yáñez, 2020; Vafajou et al., 2020; Yang et al., 2020).

Enumeras são as formas e aplicações dos processos de soldagem. Todas podem denegrir o material de forma microestrutural e estrutural (Silva et al., 2020). A escolha dos melhores parâmetros de soldagem, para cada material, é uma busca contínua dos pesquisadores em engenharia e ciência dos materiais. Os melhores parâmetros são aqueles que interferem minimamente nas propriedades físicas do material base, já que é possível que essas mudanças não sejam bem vindas para o projeto em questão (Tavares et al., 2020).

Os elementos finitos são uma das muitas ferramentas que vêm respondendo quais são os melhores parâmetros de aporte térmico ou de soldagem para cada material, sem que esse sofra uma grande mudança estrutural (Wei et al., 2020). Diante disso, a busca incessante de catalogar quais parâmetros utilizar em cada material de interesse pela indústria é uma das pesquisas mais atuais da comunidade científica (Kate & Jadhav, 2020). Um exemplo disso, é o estudo da resposta estrutural dos aços inoxidáveis ao sofrerem gradientes térmico, sendo esses materiais bastante versáteis, aplicados na indústria do petróleo, gás natural, engenharia biomédica, aeronáutica, entre outras (Faria, 2020; Hupsel, 2020).

A versatilidade dos aços inoxidáveis se relacionada com suas diferentes classes e propriedades, sendo eles martensíticos, austeníticos e ferríticos (Bajaj et al., 2020). Perante isso, esse trabalho tem como objetivo pesquisar experimentalmente sob análise numérica de elementos finitos as respostas estruturais desses materiais após passagem de uma fonte de calor. Essa fonte foi importada do trabalho de Melo et al., (2020), a partir desse dado, esta pesquisa aquisitou a resposta estrutural ao aporte térmico para cada material. Comparando-os entre si e catalogando suas respostas e propriedades físicas para possíveis trabalhos futuros.

## **2. Metodologia**

Foi realizada uma pesquisa experimental de análise numérica de dados com abordagem computacional. O trabalho foi quantitativo de acordo com os conceitos de metodologia de pesquisa científica (Shitsuka et al., 2005; Pereira et al., 2018).

A pesquisa continuou a modelagem numérica de Melo et al., (2020), onde foi obtido perfil térmico durante passagem de fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430, para

realizar uma aquisição numérica do perfil tensão deformação dos três materiais, após a passagem da fonte de calor.

O trabalho de Melo et al., (2020) foi realizado no *software* de elementos finitos Ansys® *Academic* 2020 R1. Foram criadas chapas dos materiais supracitados, com as dimensões de **150x200x2 mm** e um caminho de fluxo de calor de **180 mm**. A velocidade de passagem do fluxo foi de **18 mm/s** gerando um tempo de passagem de **10 s**. A pesquisa utilizou o modelo matemático da condução de calor transiente para sólidos. A fonte de calor inserida foi o modelo matemático da Gaussiana, obtida pelo próprio *software*, com as condições de raio do feixe de energia = **-5 mm** e intensidade de energia da fonte = **50000 W/mm<sup>2</sup>**. Também foram criadas três malhas, com convergências de resultados para análise estatística.

O perfil térmico foi construído de acordo com a temperatura total obtida em cada material, temperaturas pontuais obtidas no início da passagem da fonte de calor (distâncias de 10, 20 e 30 mm) e o fluxo total de temperatura. O aporte térmico gerado para cada material foi de **2860,7 K** para o AISI 410, **2824,2 K** e **2814,0 K** para os AISI 304L e 430. O fluxo de temperatura gerado em cada material foi de **9,2168 W/mm<sup>2</sup>**, **5,8271 W/mm<sup>2</sup>** e **9,0736 W/mm<sup>2</sup>** para os AISI 410, 304L e 430, respectivamente. A estatística dos resultados mostrou uma diferença entre os AISI 410 e 430 com o AISI 304L nos valores de fluxo de temperatura.

Para aquisição do perfil tensão deformação, a modelagem também foi realizada no *software* de elementos finitos Ansys® *Academic* 2020 R1. As condições de contorno consideradas foram: os resultados térmicos do trabalho de Melo et al., (2020), variações transientes das propriedades físicas estruturais do material (densidade, módulo de Young, coeficiente de Poisson e coeficiente de expansão térmica), geometria do material e a malha.

O modelo matemático para análise tensão deformação ponderaram as propriedades de natureza elásticas, plásticas e térmicas. As considerações de tensões e deformações metalúrgicas não foram desconsideradas, por se tratarem de análises não triviais e que necessitam de um alto poder computacional.

A tensão total, a deformação total, e as deformações de natureza elástica, plástica e térmica são mostradas nas Equações 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

$$\sigma_{ijj} = C_{ijkl}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^t - \varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^p) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^t + \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij}^e = \sigma_{ij}^e E(T)^{-1} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}^t = \alpha_{ij}(T - T_\infty) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{\lambda \partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

onde;

$\sigma_{ijj}$  = é a tensão total;

$C_{ijkl}$  = é o tensor constitutivo elástico;

$\varepsilon_{ij}$  = é a deformação total;

$\varepsilon_{ij}^e$  = é a deformação elástica;

$\varepsilon_{ij}^p$  = é a deformação plástica;

$\varepsilon_{ij}^t$  = é a deformação térmica;

$E(T)^{-1}$  = é o módulo de Young em função da temperatura;

$\alpha_{ij}$  = é o coeficiente de expansão térmica;

$T_\infty$  = é a temperatura de referência;

$\lambda$  = é a constante dependente das propriedades estruturais do material;

$f$  = é a função dependente da superfície de escoamento.

A Tabela 1, mostra as propriedades físicas estruturais 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 ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ )	$7,75e^{-6}$	$7,9e^{-6}$	$7,72e^{-6}$
Módulo de Young (MPa)	$2,0e^5$	$1,98e^5$	$2,0e^5$
Coefficiente de Poisson	0,28	0,27	0,28
Coefficiente de expansão térmica ( $1/\text{K}$ )	$9,95e^{-6}$	$1,7e^{-5}$	$1,05e^{-5}$

Fonte: Ansys® *Academic* 2020 R1.

As aquisições numéricas de tensão deformação foram obtidas tanto de forma total no material como no início da passagem da fonte de calor a 10, 20 e 30 mm de distância. As malhas utilizadas para análise estatística foram: malha 1 (5648 nós e 5634 elementos), malha 2 (2872 nós e 2849 elementos) e malha 3 (1810 nós e 1782 elementos). As malhas utilizadas obedeceram a convergência de resultados e o poder computacional disponível para pesquisa (8 núcleos de processamento, 8 *gigabytes* de memória, 2 *gigabytes* placa de vídeo).

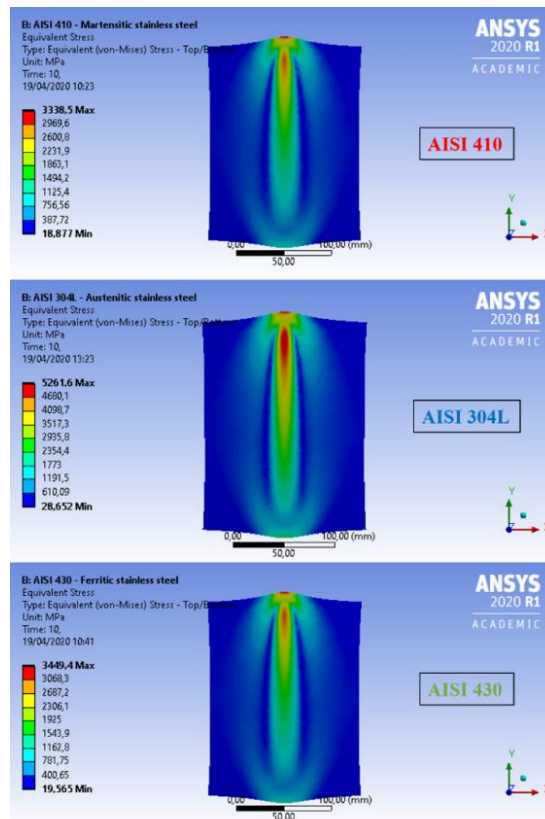
A análise estatística utilizou a análise de variância ANOVA, com o teste de múltiplas comparações de Tukey, sendo valores  $p < 0,05$  estatisticamente diferentes.

### 3. Resultados e Discussão

Com os resultados do perfil térmico de Melo et al., (2020) e com as condições de contorno empregadas nesse trabalho, foi possível aquista o perfil de tensão total gerado nos três materiais, como é mostrada na Figura 1.



**Figura 1.** Evolução da tensão máxima durante o deslocamento da fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

A Figura 1, mostra a tensão total formada em cada material, após o deslocamento da fonte de calor, para a malha mais refinada (malha 1). Percebemos uma semelhança entre o perfil da tensão nos três materiais com sutis diferenças entre valores nominais.

A relação intrínseca entre aporte térmico e as respostas estruturais, acontece em diversos materiais, sendo um campo de muitas pesquisas científicas (Potter et al., 2009; Askeland et al., 2019). O aporte térmico em um material pode ser simulado como diferentes processos de soldagem, que por sua vez geraram mudanças estruturais e microestruturais durante o procedimento (Ueda et al., 2012). As análises numéricas, mostram-se importante nesse caminho já que possibilitam previsões de possíveis tensões e deformações em um material após as variáveis térmicas (Venkateswarlu et al., 2018).

Os valores nominais de tensão obtidos foram: para o AISI 410 **3338,5 MPa**, para o AISI 304L **5261,6 MPa**, e para o AISI 430 **3449,4 MPa**. Com os resultados obtidos, notamos

uma semelhança entre os valores dos materiais AISI 410 e 430 e uma diferença com o AISI 304L. Com essa diferença de aproximadamente **1900 MPa**, esperaríamos um comportamento significativo nos valores de deformação do material, fato comprovado nos resultados desta pesquisa.

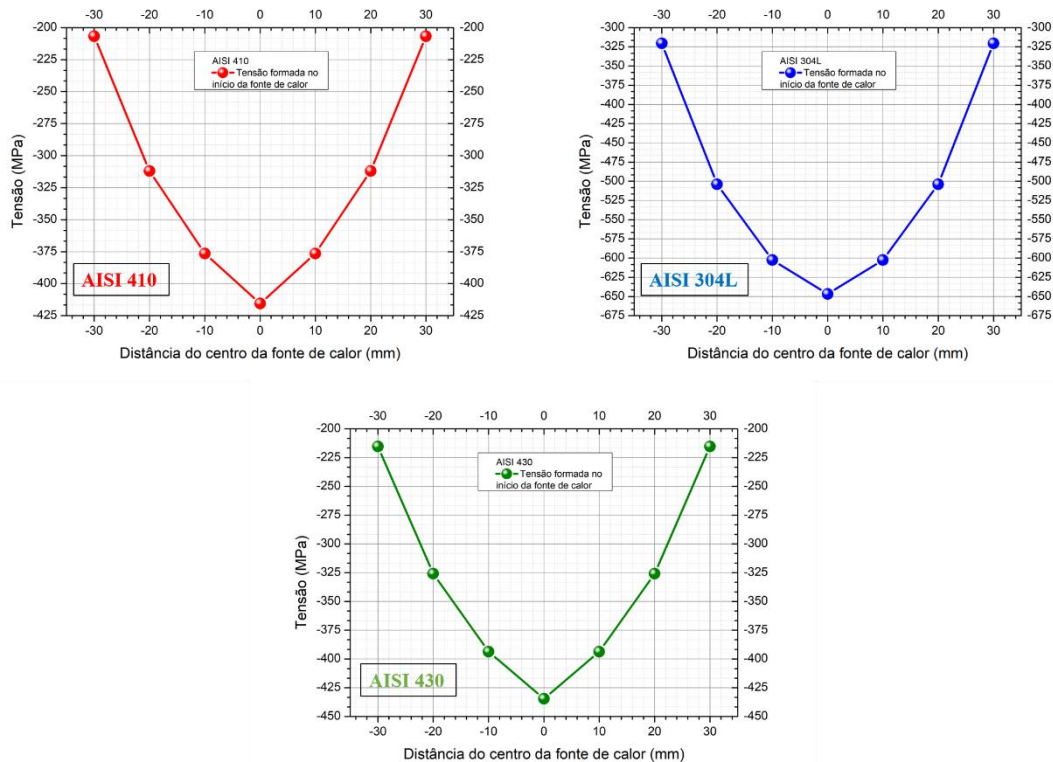
Para uma mensuração de até onde os valores diferentes de tensão podem chegar no comprimento da geometria, seria pertinente realizar uma pesquisa de *pixel* de coloração da distribuição de tensão mostrada na Figura 1, juntamente com uma análise estatística para  $P < 0,05$ , feito isso, poderíamos catalogar até qual distância houve diferença de tensão entre os materiais.

Os valores de tensão obtidos nos materiais, estão interligados com as propriedades térmica e estrutural de cada material (Singh et al., 2020). Como mostrado na Tabela 1 o material autêntico (AISI 304L) possui o maior coeficiente de expansão térmica, sendo um dos motivos de maior acúmulo de tensão, condição coerente com a literatura já que mostra que os materiais autênticos são os mais susceptíveis a mudanças estruturais e microestruturais (Poter et al., 2009; Askeland et al., 2019)

Como foi mostrado, o trabalho utilizou parâmetros iguais de aporte térmico para cada material, dados retirados de Melo et al., (2020), entretanto, em uma aplicação para um processo de soldagem, cada material deve possuir parâmetros diferentes de operação, já que se comportam de forma dessemelhante, fato comprovado nesta pesquisa e em diversas pesquisas numéricas e experimentais da literatura (Zhu & Chao, 2002; Venkateswarlu et al., 2018; Singh et al., 2020).

Os gráficos da Figura 2 mostram os pontos de medição de tensão, no início do deslocamento da fonte de calor, a **10, 20 e 30 mm** de distância.

**Figura 2.** Evolução da tensão a 10, 20 e 30 mm, do início do deslocamento da fonte de calor, nos materiais AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

Os gráficos mostram que os três materiais já emitiram uma resposta estrutural a menos de **10 mm** da passagem da fonte de calor. O AISI 410 obteve uma tensão de **376,41 MPa** (em módulo) a essa distância, e **311,99 MPa** e **206,67 MPa** a **20** e **30 mm**. O AISI 304L obteve **602,5 MPa**, **503,83 MPa** e **320,41 MPa**, as distâncias de **10**, **20** e **30 mm**, respectivamente. Já o AISI 430 obteve **393,62 MPa**, **325,88 MPa** e **215,29 MPa**, as distâncias de **10**, **20** e **30 mm**, respectivamente.

Os dados mostram que os materiais martensíticos (AISI 410) e ferríticos (AISI 430), se comportam de forma mais parecidas quando comparado ao austenítico (AISI 304L). Esse último mostra-se mais uma vez com maior tendência de acumulo de tensões, transformações estruturais e microestruturais, que por sua vez podem ser convertidas e influenciáveis em uma maior deformação do material (Jia, 2020). Visto isso, o interesse das propriedades dos materiais inoxidáveis pela indústria, deve ser intrínseco as suas propriedades finais caso esse material trabalhe em ambientes com variação térmica.

Essa avaliação mostra como a tensão se comporta no decorrer da geometria, transversalmente ao aporte térmico. As avaliações numéricas de tensão deformação se mostram bastante úteis para aquisição de dados pontuais, sobretudo porque para análises experimentais existe a necessidade de termopares e extensômetros que não sofram interferência com o aporte térmico envolvido, sendo um aparato tecnológico de alto custo (Almeida, 2012).

A velocidade com o qual a tensão aumenta ao longo da geometria de cada material, é um fator de alta relevância para a transformação estrutural e microestrutural (Jia, 2020).

Com os dados numéricos obtidos é possível equacionar uma tendência de tensão (de acordo com o aporte térmico) que de cada material sofreria além dos **30 mm** medidos. Para o AISI 410 teríamos o comportamento de acordo com o polinômio da Equação 6, para o AISI 304L e 430 as Equações 7 e 8.

$$\sigma = 0,2207x^2 - 1e^{-13}x - 403,35 \quad (6)$$

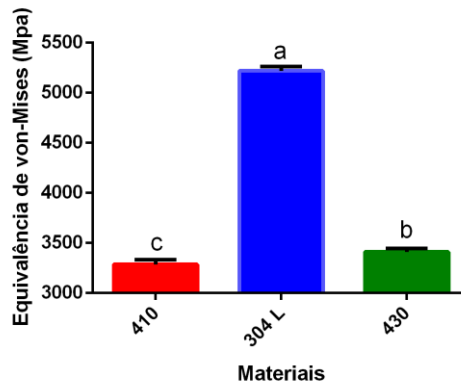
$$\sigma = 0,3569x^2 - 9e^{-14}x - 642,77 \quad (7)$$

$$\sigma = 0,2318x^2 - 7e^{-13}x - 421,87 \quad (8)$$

De acordo com a Equação 7, para **40 mm** de distância da fonte de calor o AISI 410 apresentaria **155,94 MPa**, o AISI 304L (Equação 8) apresentaria **248,97 MPa** e o AISI 410 (Equação 9) **160,97 MPa**. Notamos assim, que os materiais AISI 410 e 430, continuam ao longo da geometria tendo valores bem distintos do AISI 304L.

A Figura 3, realiza uma análise estatística comparando os valores de tensão de cada material, utilizando as três melhores malhas de convergência de resultado. A análise mostra que, embora os AISI 410 e 430 tenham um comportamento mais parecido entre si, todos os três materiais tiveram diferenças significativas para  $p < 0,05$ , com o AISI 304L, sendo a maior diferença.

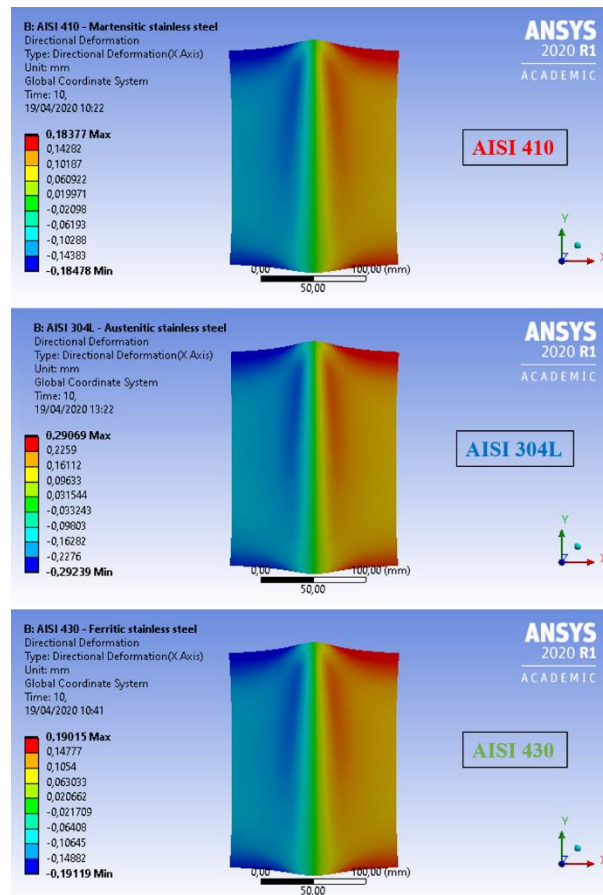
**Figura 3.** Análise estatística da variação de tensão máxima para o AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

O perfil de deformação é mostrado na Figura 4, também tendo sido obtido através dos dados de Melo et al., (2020). Aplicação de aporte térmico em um material, sempre apresentará altos valores de tensão e consequentemente deformação. Isto ocorre por que o material se dilata em até seis vezes ao sofrer um aporte térmico. Ao resfriar o material se contrai na mesma velocidade. Nenhum metal em seu estado solido tem alongamento de 600%. Significa que o material no local que sofreu o aporte térmico, irá escoar por tração à medida que resfria e durante o resfriamento haverá tensões compressivas para balancear a zona na qual o material sofreu o gradiente térmico (Bauchau & Craig, 2009; Norton, 2013).

**Figura 4.** Evolução da deformação máxima durante o deslocamento da fonte de calor nos materiais AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.

Na Figura 4, temos a deformação total de cada material estudado, para a malha 1, após o deslocamento da fonte de calor. É possível notar que os três se deformaram com o mesmo perfil, de acordo com a literatura, que mostra a forma de deformação para um aporte longitudinal a geometria (Bauchau & Craig, 2009; Norton, 2013). Os valores de deformação entre os três materiais, se mostram parecidos, com uma pequena variação.

O AISI 410 obteve uma deformação nominal de **0,183 mm**, quanto que os AISI 304L e 430 obtiveram **0,29** e **0,19 mm**, respectivamente. Comparando com os valores de tensão já supracitados, notamos que os valores de deformação seguem o mesmo padrão, sendo  $410 < 430 < 304L$ .

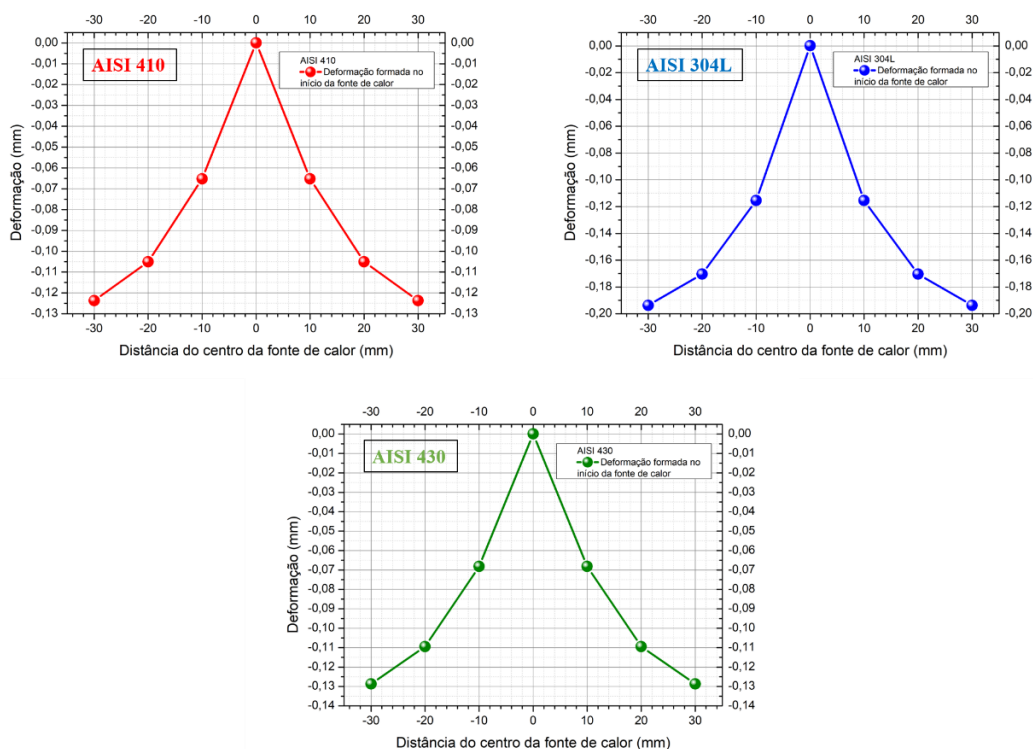
Ao analisar as propriedades físicas da Tabela 1, percebemos que os valores de densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson, são muito próximos entre os três materiais, havendo uma diferença mais significativa no coeficiente de expansão térmica.

Sendo essa última propriedade uma possível resposta para o maior acúmulo de tensão e deformação do AISI 304L. Mostrando a intrínseca relação entre aporte térmico com respostas estruturais.

Na Figura 5 é mostrado os gráficos com medição de deformação no início do deslocamento da fonte de calor, a 10, 20 e 30 mm. Essa análise mostra como a deformação se comporta no decorrer transversal ao aporte térmico. A direção de um carregamento mecânico (uma aplicação qualquer) versus a direção do aporte térmico, tem um valor significante na resistência do material (Norton, 2013; Askeland et al., 2019). Carregamentos longitudinais ao aporte térmico, possuem um maior escoamento e deformação do material. Entretanto, testes mostram que materiais carregados transversalmente ao aporte térmico, tem resistência de até 50% a mais que materiais carregados longitudinalmente (Norton, 2013)

Em uma simulação de processo de soldagem, a escolha de um projeto que os carregamentos sejam transversais a solda é preferível, visto que soldas são projetadas para ruptura e não escoamento (Norton, 2013).

**Figura 5.** Evolução da deformação a 10, 20 e 30 mm, do início do deslocamento da fonte de calor, nos materiais AISI 410, 304L e 430.



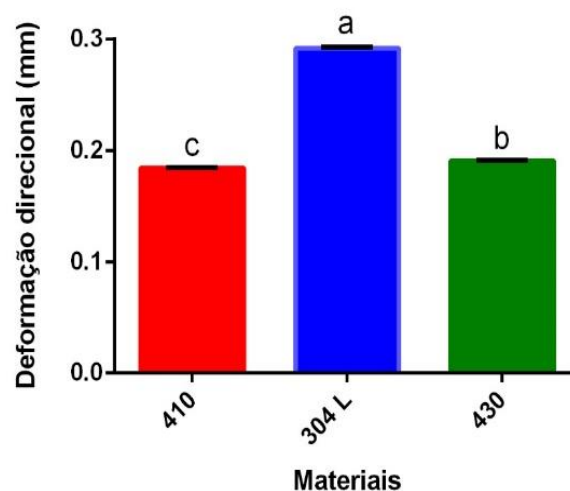
Fonte: Autor.

Assim como os gráficos de tensão, a deformação dos materiais se apresentou a distancias inferiores a **10 mm** da fonte de calor. O material martensíticos (AISI 410) obteve uma deformação (em módulo) de **0,065 mm** a **10 mm**, e **0,105** e **0,123 mm** a **20** e **30 mm**, respectivamente. O austenítico (AISI 304L) obteve **0,115**, **0,17** e **0,193 mm** a **10**, **20** e **30 mm**, e o ferríticos (AISI 430) obteve **0,068**, **0,109** e **0,128 mm** a **10**, **20** e **30 mm**, respectivamente.

Os dados de deformação, como era de se esperar, obedeceram ao mesmo perfil que os dados mostrados de tensão. Os AISI 410 e 430 se comportaram de forma mais semelhante quando comparado ao 304L. A tendência de deformação mais acentuada do austenítico, além de estar relacionada com maior facilidade de transformações microestruturais desses materiais, a um nível macroestrutural o AISI 304L se torna mais encruado, e conseqüentemente mais fragilizado (Ueda, 2012; Wei et al., 2020). Embora o austenítico tenha apresentado uma maior tendência de encruamento, em menor grau os outros dois materiais também apresentaram, sendo uma condição inevitável em um processo de deformação.

A análise estatística comparando os valores de deformação das três matérias é mostrada na Figura 6. O perfil mostra que os três materiais obtiveram diferenças significativas para  $p < 0,05$ .

**Figura 6.** Análise estatística da variação de deformação máxima para o AISI 410, 304L e 430.



Fonte: Autor.



Quando comparamos os valores de tensão deformação, vemos que os materiais obedeceram a um perfil semelhante, em que o AISI 304L teve os maiores valores em ambos os casos. Pelas análises estatísticas percebemos um resultado contra intuitivo, em que por mais que os AISI 410 e 430 estiverem com valores parecidos, todos os três materiais obtiveram diferenças significativas para  $p < 0,05$  utilizando o teste Tukey.

Em uma aplicação industrial, todo material, em particular inoxidável, deve ser selecionado para um projeto com previsões de possíveis formações de tensão e deformação, caso sofra um aporte térmico, pois como vimos nessa pesquisa, e como já é estabelecido na literatura, as ciências térmicas e estruturais são inerentes.

#### 4. Considerações Finais

Ainda que tenha havido baixo poder computacional disponível, o objetivo da pesquisa foi cumprido. Foi possível realizar a aquisição numérica do perfil tensão deformação dos três materiais AISI 410, 304L e 430, utilizando os dados numéricos do perfil térmico durante passagem de uma fonte de calor nos mesmos materiais por Melo et al., (2020).

A modelagem matemática com o *software* de elementos finitos Ansys® Academic 2020 R1, mostrou dados de tensão deformação coerentes com uma possível simulação de um processo de soldagem, bem como dados da literatura e de outras pesquisas numéricas.

Comparando o perfil tensão deformação entre os materiais, embora os AISI 410 e 430 tenham tido valores mais próximos quando comparado com o AISI 304L, todos possuíram mudanças significativas para uma análise estatística de  $p < 0,05$ . Nesse sentido, por motivos classe de material, resposta térmica e estrutural, é esperado que cada um possua mudanças microestruturais particulares.

Diante disso, essa pesquisa tem como sugestões futuras, realizar análises microestruturais de cada material apresentado, objetivando uma correlação entre essas mudanças com o aporte térmico e sua resposta estrutural. Além disso, essa pesquisa permite empregar dessa mesma metodologia para estudar outros materiais, bem como outras geometrias.

## 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*. Editora Saraiva.

Antunes, J. (2009). *Sistemas de produção: conceitos e práticas para projetos e gestão da produção enxuta*. Bookman Editora.

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>.

Arregui Mena, J. D., Worth, R. N., Hall, G., Edmondson, P. D., Giorla, A. B., & Burchell, T. D. (2020). A Review of Finite Element Method Models for Nuclear Graphite Applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(1), 331-350.

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

Bajaj, P., Hariharan, A., Kini, A., Kürnsteiner, P., Raabe, D., & Jäggle, E. A. (2020). Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138633.

Bauchau, O. A., Craig, J. I. (2009). *Structural Analysis with Applications to Aerospace Structures*. London. Ed. Springer.

Campoccia, D., Montanaro, L., & Arciola, C. R. (2013). A review of the biomaterial's technologies for infection-resistant surfaces. *Biomaterials*, 34(34), 8533-8554.

Dehestani, H., Ordokhani, Y., & Razzaghi, M. (2020). Numerical Technique for Solving Fractional Generalized Pantograph-Delay Differential Equations by Using Fractional-Order

Hybrid Bessel Functions. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 6(1), 1-27.

Faria, D. P. (2020). *Análise mecânico-estrutural de uma vareta de combustível de aço inoxidável sob condições de ensaio de arrebentamento* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Hupsel, A. L., Borges, C. P., Barbosa, G. M., & Gonzalez, N. Y. (2020). Combinação de processos com membranas para remoção de sulfato da água do mar para injeção em reservatórios de petróleo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 25(2), 403-412.

Jia, B., Rusinek, A., Pesci, R., Bahi, S., & Bernier, R. (2020). Thermo-viscoplastic behavior of 304 austenitic stainless steel at various strain rates and temperatures: Testing, modeling and validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 170, 105356.

Kate, A. J., & Jadhav, S. V. (2020). Analysis of Fillet Weld Used for Structural Support in Offshore Industry. In *Techno-Societal 2018* (pp. 789-799). Springer, Cham.

Lima, D. M., & López-Yáñez, P. A. (2020). Elastic dynamics analysis in steel tubular towers for horizontal axis wind turbines. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 36(1).

Lotti, R. S., Machado, A. W., Mazzeiro, Ê. T & Landre Jr, J. (2006). Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial*, 11(2), 35-43.

Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. London. Ed. 2°. Springer.

Melo, R., Maia, A., Rocha Junior, D., Carvalho, A., Silva, F., Queiroz, P., & Souza, I. (2020). Numerical obtaining of the thermal profile during the passage of the heat source in the materials AISI 410, 304L and 430. *Research, Society and Development*, 9(7), e63973884.

Norton, R. L. (2013). *Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada*. Porto Alegre. Ed. 4°. Bookman.

Paiva Silva, A., Cândido, L. C., Trindade, V. B., & Dornelas, P. H. G. (2020). Análise dos efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera e particionamento, na microestrutura e propriedades mecânicas de três aços C-MN de aplicação API. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 16(4), 504-511.

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

Pires, A. L. R., Bierhalz, A. C., & Moraes, Â. M. (2015). Biomateriais: tipos, aplicações e mercado. *Química nova*, 38(7), 957-971.

Pontes, E. A. S. (2019). A linguagem universal: Matemática suas origens, símbolos e atributos. *Revista Psicologia & Saberes*, 8(12), 181-192.

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

Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. London. Ed 2°. Springer.

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*.

Tavares, T. B., Porcaro, R. R., Cândido, L. C, Faria, G. L. & Dâmaso, H. V. (2020). Desenvolvimento de dispositivo de baixo custo para mecanização da soldagem GTAW e sua aplicação em estudo de solidificação de aço ABNT 430. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 17(1), 13-22.

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

Vafajou, B., Dias-Da-Costa, D., Bitencourt, L. A. G., & Manzoli, O. L. (2020). Coupling Finite Elements for Modelling Fluid Flow in Fractured Porous Media. In *ACMSM25* (pp. 361-371). Springer, Singapore.

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.

Wei, Z., Jin, H., & Chen, G. (2020). Traction structural stress analysis of fatigue behaviors of girth butt weld within welded cast steel joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 179, 104027.

Yang, X., Ouyang, H., Guo, X., & Li, D. (2020). Finite Element Modelling and Damage Detection of Seam Weld. In *Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures* (pp. 51-62). Springer, Singapore.

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 – 20%

Isabel Cristina da C6sta Souza – 20%

Allan da Silva Maia – 7,5%

Fernanda Monique da Silva – 7,5%

Paulo Ricardo Queiroz – 7,5%

Dehon da Rocha Junior – 7,5%

Anne Caroline Brito Carvalho – 7,5%

Jo6o Paulo Costa Fernandes – 7,5%

Jo6o Felipe Vieira Lima – 7,5%

Luiz Paulo de Oliveira Queiroz – 7,5%