

## Estudo do comportamento termomecânico do aço inoxidável AISI 430 por meio da termografia por infravermelho

### Study of the thermomechanical behavior of AISI 430 stainless steel through infrared thermography

Vinícius Melo Cangussu<sup>1</sup>, Diogo Azevedo de Oliveira<sup>1</sup>,  
Alexandre Mendes Abrão<sup>1</sup>, Frederico de Castro Magalhães<sup>1</sup>, Haroldo Béria Campos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP: 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil  
e-mail: viniciusmelocangussu@gmail.com, diogoazev@yahoo.com.br, abrao@demec.ufmg.br, fredmag.castro@gmail.com

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar o aumento da temperatura em chapas de aço inoxidável AISI 430 durante o ensaio de tração para as seguintes taxas de deformação: 0,001; 0,01 e 0,1 s<sup>-1</sup>. Para registrar a evolução da temperatura até a fratura dos corpos de prova, foi utilizada uma termocâmera por infravermelho. Os resultados obtidos pela técnica da termografia por infravermelho mostraram um aumento gradual e uniforme da temperatura durante o encruamento do material e uma elevação drástica da temperatura nas regiões de estrição e fratura dos corpos de prova. Para a taxa de deformação de 0,1 s<sup>-1</sup> foi observado o maior gradiente de temperatura entre a estrição localizada e a fratura (110 °C).

**Palavras-chave:** Aço inoxidável AISI 430, Termografia por infravermelho, Taxas de deformação, Temperatura.

#### ABSTRACT

This study aims to correlate the temperature increase induced by the strain rate of AISI 430 stainless steel sheets during the tensile test and considering the following strain rates: 0.001; 0.01 and 0.1 s<sup>-1</sup>. In order to record the evolution of the temperature until the fracture of the specimens, an infrared thermographic camera was used. The results of infrared thermography showed a gradual and uniform increase in temperature during the work hardening of the material and a drastic temperature elevation in the regions of localized necking and fracture of the specimens. For the deformation rate of 0.1 s<sup>-1</sup> the highest temperature gradient between localized necking and fracture was observed (110 °C).

**Keywords:** AISI 430 stainless steel, Infrared thermography, Strain rate, Temperature.

#### 1. INTRODUÇÃO

Durante a conformação mecânica de chapas planas, a peça estampada pode estar sujeita a diferentes estados de deformações plásticas (biaxial, uniaxial e plana, por exemplo). Segundo BANABIC [1], a ocorrência de defeitos como fratura, estrição, empenamento, enrugamento e distorção de forma é relativamente comum durante o processamento das chapas metálicas que podem resultar no descarte do produto final. Dentre os fatores que afetam a estampabilidade de uma chapa plana tem-se: tamanho e geometria do blank, geometria do ferramental, tipo de lubrificante, força do eventual prensa-chapa e a taxa de deformação, que influencia significativamente na estampabilidade do metal [2]. De um modo geral, a fabricação de uma determinada peça é bem-sucedida quando são empregadas baixas taxas de deformação, e, caso haja um aumento nessa taxa de deformação durante o processamento da chapa metálica, pode haver deformação plástica não uniforme, e, conseqüentemente, estrição localizada, como sugerem ALTAN e TEKKAYA [3].

Além disso, é sabido que quando um material metálico é deformado plasticamente, 95% do trabalho mecânico de deformação por volume é convertido em calor. Uma parcela deste calor é conduzida para as ferramentas ou transferida para a atmosfera, porém, a parcela remanescente, é responsável pelo aumento da temperatura do componente trabalhado [4]. Os outros 5% são responsáveis pelo movimento e aniquilação dos defeitos e da energia acumulada pela a criação de discordâncias na estrutura. Conforme HOSFORD e CADDELL [5], nos processos de conformação de chapas metálicas, nos

quais são aplicadas altas taxas de deformação, é observado um apreciável aumento na temperatura, que em determinados materiais (aço inoxidável AISI 430), por exemplo, pode alterar o seu estado de deformação e suas propriedades mecânicas. Dessa forma, o conhecimento dos estados de deformação plástica, da distribuição da temperatura de chapas metálicas submetidas a diferentes taxas de deformação e das condições de transferência de calor são essenciais para a produção de uma peça isenta de defeitos de natureza mecânica e térmica.

Para estudar o aquecimento induzido durante a deformação plástica de um material podem ser utilizadas técnicas não destrutivas com e sem contato. A técnica não destrutiva com contato é caracterizada pela fixação de termopares junto ao material, enquanto que a sem contato adota o uso de câmeras termográficas. O uso de termopares para a medição de temperatura apresenta alguns inconvenientes como a necessidade de soldá-los na superfície do material a ser estudado e registrar apenas temperaturas pontuais [6]. Além disso, conforme HOSFORD e CADDELL [5], durante o processo de soldagem dos termopares podem ter sido geradas heterogeneidades superficiais, as quais afetam diretamente o estado de deformação uniforme.

A termografia por infravermelho é uma técnica de medição de temperatura sem contato em que a radiação infravermelha emitida por um objeto é registrada usando uma câmera infravermelha. A temperatura do objeto é medida a partir da intensidade da radiação usando a lei de Stefan-Boltzmann [7]. Para VILLAR *et al.* [8], embora a técnica da termografia por infravermelho seja bem conhecida na avaliação não destrutiva de amostras metálicas e na detecção de defeitos na soldagem de materiais, por exemplo, essa técnica começou a ser difundida apenas no final da década de 1970. Em relação às técnicas com contato, a termografia por infravermelho tem a vantagem de realizar medições de temperatura em áreas maiores que podem ser digitalizadas com alta confiabilidade e exatidão. Dentre os primeiros trabalhos relatados na área de monitoramento da temperatura de objetos submetidos a esforços de tração destaca-se WILBURN [9], no qual dois sistemas de radiômetro de infravermelho foram usados para monitorar os perfis de temperatura durante o ensaio de tração de aços ligados, demonstrando a viabilidade dessa técnica, por ser rápida e exata. HUANG *et al.* [10] monitoraram a temperatura durante a deformação elástica de aços com baixo e médio carbono. Em ambos os trabalhos experimentais, o ensaio de tração foi realizado empregando apenas uma taxa de deformação ( $0,0001 \text{ s}^{-1}$ ). Além disso, os radiômetros usados por WILBURN [9] e HUANG *et al.* [10] tinham resolução limitada e registrava a temperatura média em grandes áreas projetadas. SACHEV e HUNTER [11] usaram o scanner AGA Thermovision 680 para medir o aumento da temperatura durante o ensaio de tração do aço *Dual-Phase* e de alta liga (HSLA). Os valores obtidos foram comparados com os valores previstos para condição teórica de aquecimento adiabático, a qual superestimou os valores medidos experimentalmente. Recentemente, os estudos termomecânicos que envolvem o uso da termografia por infravermelho restringem-se mais aos ensaios de tração, nos quais procura-se avaliar o aumento da temperatura durante as deformações elástica e plástica, na estrição e na fratura de diferentes materiais [12- 14]. Além disso, esses estudos auxiliam no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever a temperatura em função do material, tensão, deformação e taxa de deformação até a tensão de resistência máxima do material e transformações de fase induzidas pela deformação plástica [15].

Tendo em vista a viabilidade e a exatidão dos resultados obtidos pela técnica da termografia por infravermelho, este trabalho visa investigar o aumento de temperatura mediante a deformação plástica por meio do ensaio de tração de chapas de aço inoxidável AISI 430 e o quanto as taxas de deformação influenciam nestes aumentos. Dessa forma, o conhecimento prévio do comportamento termomecânico do aço inoxidável AISI 430, que é largamente usado em diferentes setores da indústria de conformação de chapas, visa auxiliar o entendimento de sua estampabilidade quando conformado a frio, o que pode ser crucial para a produção de determinados produtos isentos de defeitos.

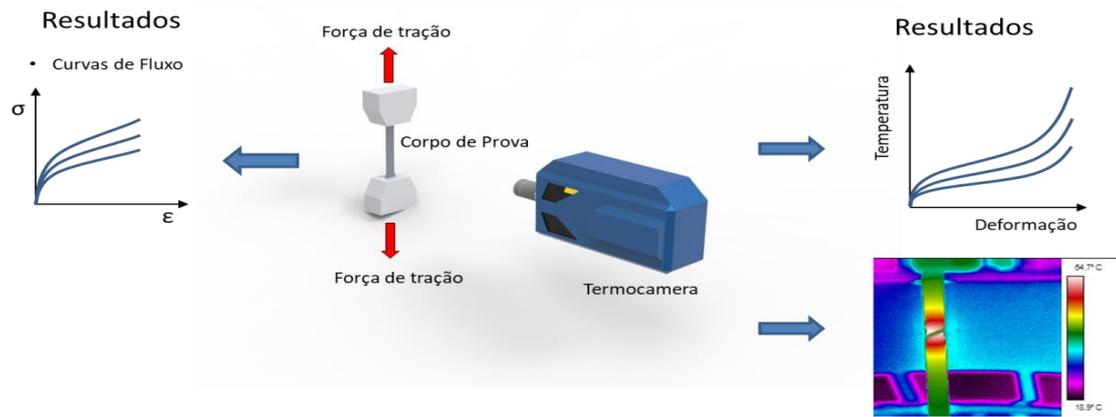
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química das chapas planas de aço inoxidável AISI 430 usadas para a confecção dos corpos de provas foi obtida por via úmida e o resultado é mostrado na Tabela 1. A composição química do material a ser testado está condizente com as especificações da AISI [16].

**Tabela 1:** Composição química das chapas de aço AISI 430 (% em massa).

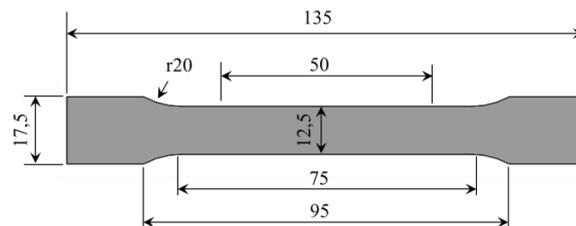
C	Si	Mn	Cr	Ni
0,06	0,4	1,68	18,1	9,1
max 0,15	max 0,50	max 1	11,5 – 13,0	min 0,60

A Figura 1 representa de forma esquemática a configuração experimental para investigar o comportamento termomecânico do aço inoxidável AISI 430 submetido a esforços monotônicos com diferentes velocidades de deformação. Durante a realização do ensaio de tração são coletadas informações relativas à curva de fluxo e temperatura para posterior análise.



**Figura 1:** Representação esquemática do procedimento experimental.

Para analisar o comportamento termomecânico do aço inoxidável AISI 430, corpos de provas planos foram fabricados de acordo com a norma NBR 6152/2002 (Figura 2). A fim de evitar quaisquer alterações metalúrgicas durante a fabricação dos corpos de prova, esses foram cortados por jato de água. Para este estudo, foram retirados nove corpos de provas paralelos à direção de laminação de uma chapa plana com espessura nominal de 1,5 mm.



**Figura 2:** Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração (em mm).

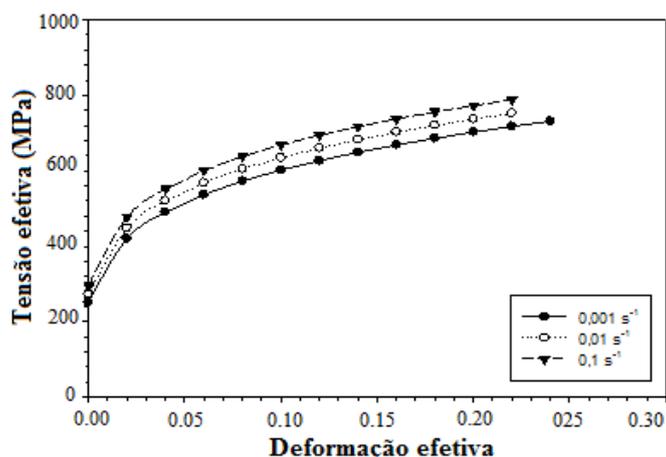
Os corpos de prova (dureza média de  $200 \pm 5$  HV), foram submetidos a esforços monotônicos trativos com diferentes velocidades de deformação (5, 50 e 500 mm/min) a fim de se obter as seguintes taxas de deformação: 0,001; 0,01;  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Para cada velocidade de deformação foram utilizados três corpos de prova. Para a realização dos ensaios trativos foi utilizada a máquina universal de ensaios Shimadzu-AG-IS de 100 kN.

As medições dos gradientes de temperatura durante os ensaios de tração foram realizadas pela câmera infravermelha AGEMA 550 Elite, com objetivas de  $20^\circ \times 20^\circ$ , associada ao *software Irwin Research 2.1* para registrar as imagens térmicas. Para evitar a influência do ângulo de visão, a câmera foi posicionada de forma que seu eixo permanecesse perpendicular às superfícies das amostras. A distância da câmera até cada amostra foi mantida em 500 mm para todos os ensaios e usou-se uma emissividade de 0,90. As imagens térmicas foram adquiridas continuamente a uma taxa de 50 quadros por segundo durante os ensaios de tração e armazenadas digitalmente em um computador pessoal. Para melhorar a qualidade das imagens e diminuir possíveis ruídos causados por reflexos térmicos, os corpos de prova foram pintados na cor preta fazendo o uso de um corante acrílico preto fosco, visando garantir as condições de um corpo negro. Os ensaios termomecânicos foram realizados a uma temperatura ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade de 25 a 60% Hr.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção será apresentada e discutida a evolução da temperatura máxima durante o ensaio de tração em relação às três taxas de deformação utilizadas.

A Figura 3 mostra o comportamento das curvas de tensão efetiva em função da deformação efetiva obtida para as chapas de aço inoxidável AISI 430 para as suas respectivas taxas de deformação.

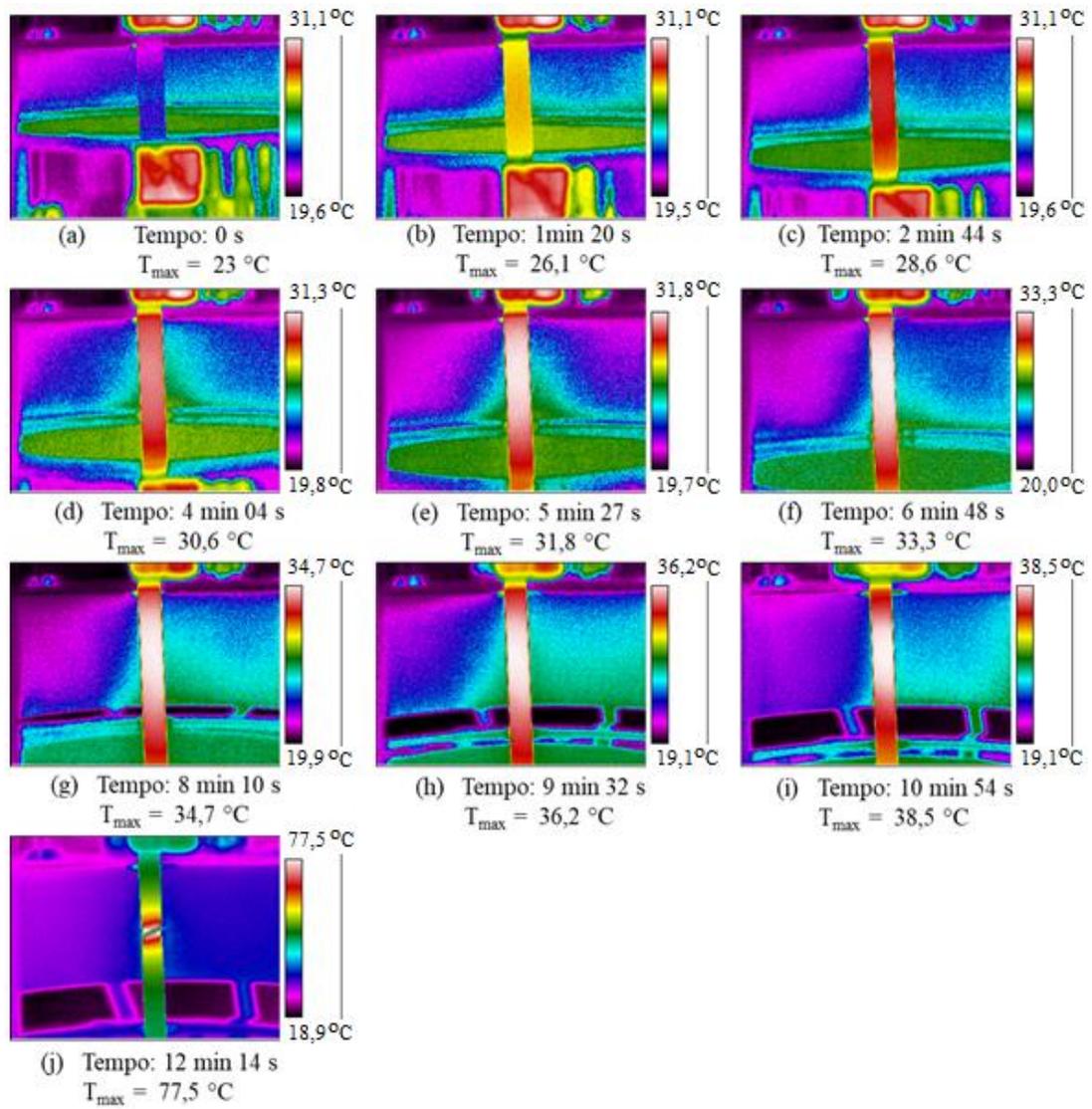


**Figura 3:** Evolução da tensão de engenharia para diferentes taxas de deformação do aço inoxidável AISI 430.

Conforme DIETER [4], quanto maior a taxa de deformação maior será a tensão de escoamento e resistência máxima do material. Para as taxas de deformação aplicadas no ensaio de tração do aço inoxidável AISI 430 foram obtidos os seguintes valores para a tensão limite de escoamento:  $218 \pm 5,27$  MPa ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ );  $236 \pm 2,30$  MPa ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ ) e  $256 \pm 7,34$  MPa ( $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) e para tensão limite de resistência à tração:  $527 \pm 20,05$  MPa ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ );  $554 \pm 15,22$  MPa ( $0,01 \text{ s}^{-1}$ ) e  $582 \pm 12,75$  MPa ( $0,1 \text{ s}^{-1}$ ). Em termos de encruamento do material, fez-se necessário determinar as curvas de fluxos para cada taxa de deformação. Para isso, foram determinadas as curvas de Hollomon:  $\sigma = 1006,3 \cdot \varepsilon^{0,223}$  ( $R^2 = 0,998$ ) para  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ,  $\sigma = 1044,6 \cdot \varepsilon^{0,216}$  ( $R^2 = 0,998$ ) para  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $\sigma = 1082,1 \cdot \varepsilon^{0,209}$  ( $R^2 = 0,999$ ) para  $0,1 \text{ s}^{-1}$ .

Observando o expoente de encruamento das equações de Hollomon, pode-se perceber que para a taxa de deformação  $0,001 \text{ s}^{-1}$  apresentou o maior valor (0,223). Em termos de estampabilidade, para essa taxa de deformação o aço inoxidável AISI 430 deformará mais uniformemente do que as outras taxas, confirmando as recomendações propostas por ALTAN e TEKKAYA [3].

As Figuras 4 a 6 mostram imagens térmicas registradas pela termocâmara durante o ensaio de tração até a ruptura do material para diferentes níveis de taxa de deformação e as suas respectivas temperaturas máximas a cada intervalo de tempo. Para uma mesma taxa de deformação, observou-se que em determinados ensaios as temperaturas induzidas pela deformação apresentaram em termos percentuais valores menores nas áreas de estrição (~25%) e fratura (~57%). Ao analisar esses corpos de prova, verificou que a tinta não aderiu adequadamente à superfície. De acordo com ROBISON *et al.* [17], as indicações de temperatura termográfica podem diferir ligeiramente entre as amostras devido a alguma incerteza no valor de emissividade com a tinta aplicada (0,90 em todos os casos), aplicação inadequada e a interferência de reflexos térmicos.



**Figura 4:** Evolução da temperatura máxima durante o ensaio de tração para a taxa de deformação de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ .

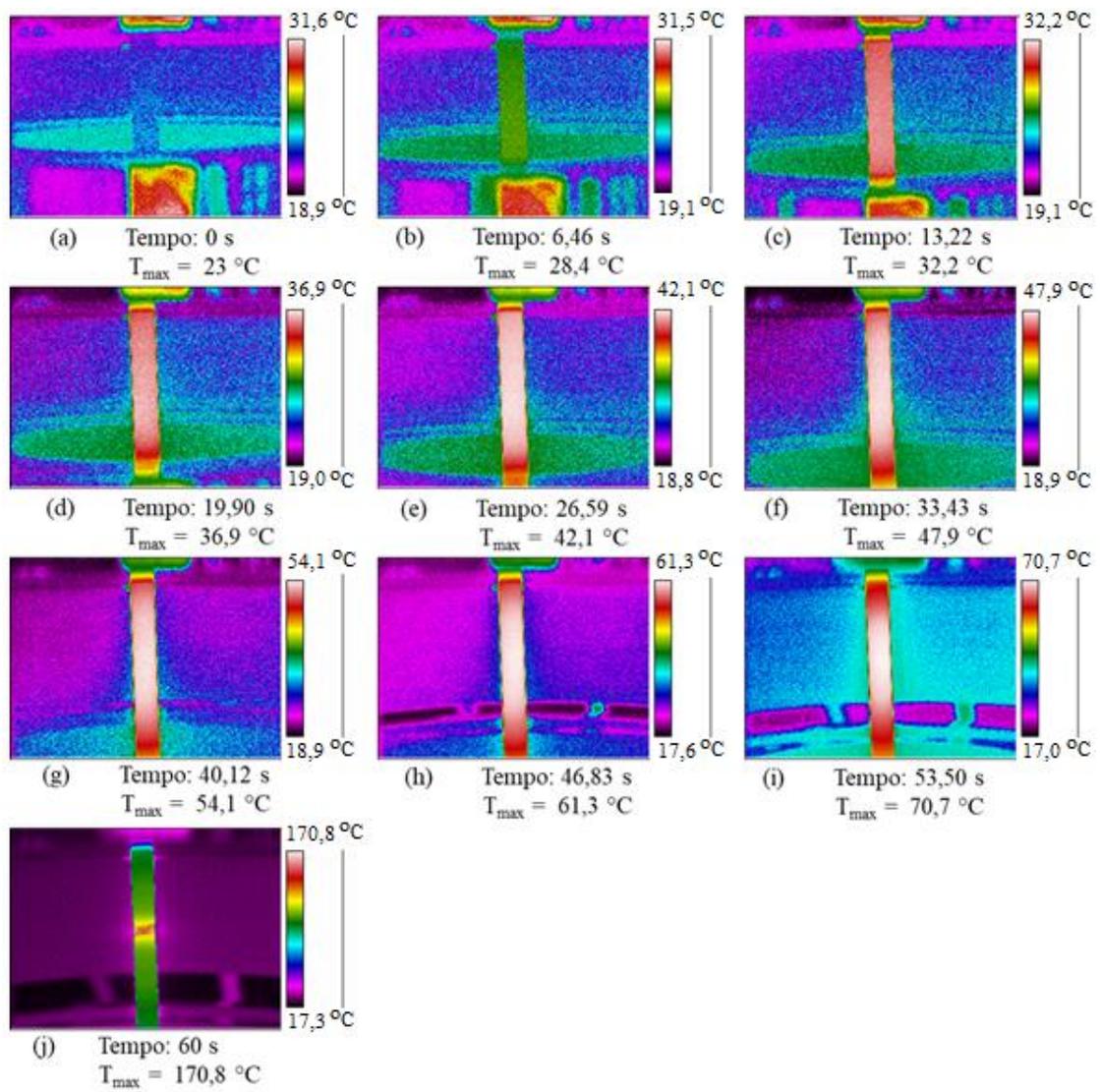
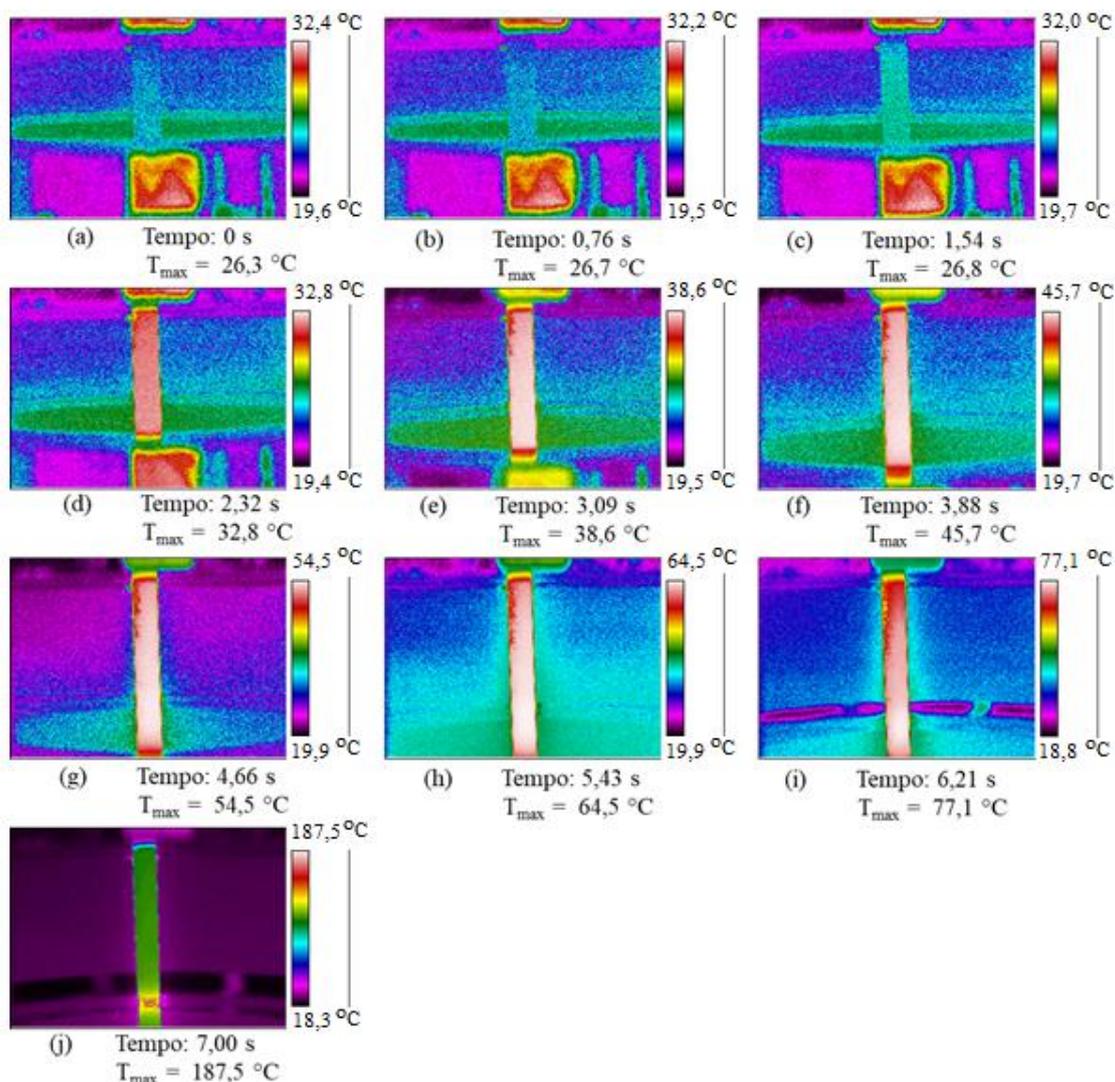


Figura 5: Evolução da temperatura máxima durante o ensaio de tração para a taxa de deformação de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ .

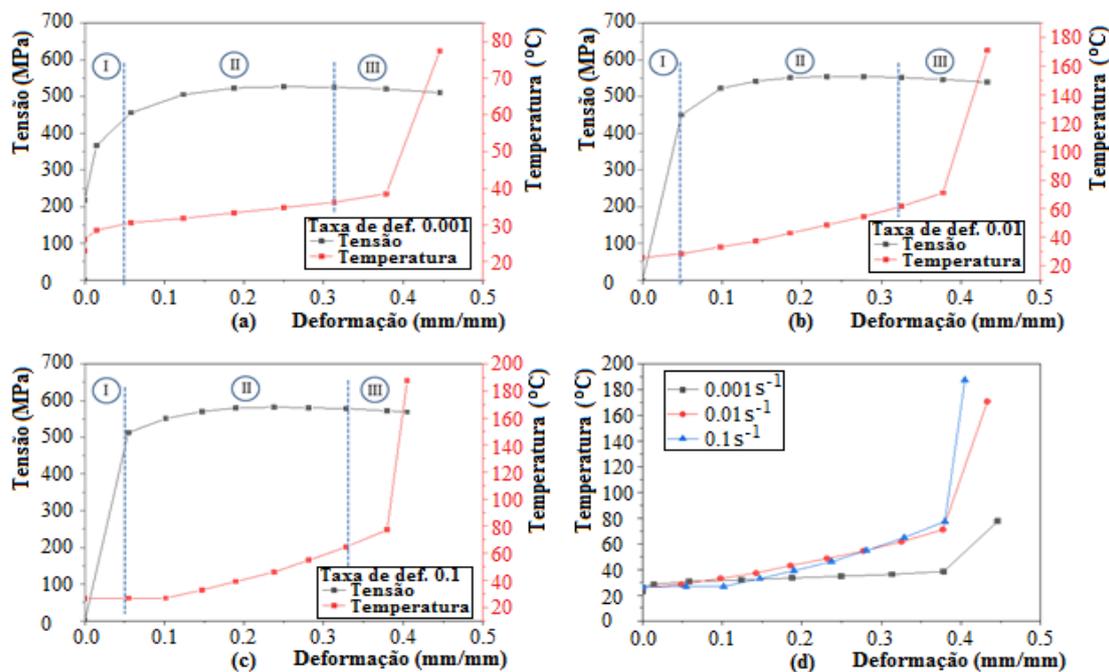


**Figura 6:** Evolução da temperatura máxima durante o ensaio de tração para a taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ .

No ensaio de tração uniaxial, o material é submetido a uma deformação plástica progressiva e, em determinado momento, próximo à tensão máxima, aproximadamente 0,32 de deformação, inicia-se nucleação das cavidades internas, que é seguida pelo crescimento e o coalescimento dessas cavidades levando à fratura do material. Durante a deformação plástica, a energia armazenada é convertida em energia térmica, resultando no aumento da temperatura da amostra. O aumento de temperatura durante a estrição é decorrente da energia de deformação localizada. Além disso, a taxa de deformação varia exponencialmente com a tensão triaxial [18]. Portanto, o aumento da temperatura durante a deformação plástica do material é maior para a maior taxa de deformação. Sendo assim, analisando as imagens das Figuras 4(a) a 4(c), para todas as taxas de deformação, constatou-se que não ocorreram aumentos significativos nas temperaturas máximas, indicando que as deformações impostas aos corpos de prova encontravam-se no regime elástico (deformação reversível). Novamente para todas as taxas de deformação, as imagens das Figuras 4(d) a 4(h), indicam que os aumentos de temperatura foram praticamente lineares,  $2 \text{ °C}$  para  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ,  $6 \text{ °C}$  para  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $7 \text{ °C}$  para  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , evidenciando que os corpos de prova estão sujeitos a deformações plásticas uniformes. Esse estado de deformação cessa quando é alcançada a resistência máxima.

A partir da Figura 4(i) até o instante da fratura do material (Figura 4j) os aumentos foram significativos:  $38 \text{ °C}$  para  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ;  $100 \text{ °C}$  para  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $110 \text{ °C}$  para  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , indicando uma deformação não uniforme. O mesmo comportamento foi observado nas Figuras 5 e 6.

Analisando as imagens das Figuras 4(j), 5(j) e 6(j), independentemente da taxa de deformação, a técnica da termografia por infravermelho foi capaz de indicar a priori a região de falha (maior temperatura) durante a deformação dos corpos de prova. Em termos de comparação, a temperatura máxima na região da fratura do material submetido a uma taxa de deformação de  $0,1 \text{ s}^{-1}$  foi de  $187,5 \text{ °C}$ , isto é, 59% maior quando se aplicou uma taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  ( $77,5 \text{ °C}$ ). Uma forma de avaliar esses perfis de aumento na temperatura nos regimes elástico, plástico e na região da fratura é sobrepondo as variações da tensão e da temperatura em função da deformação de engenharia (Figura 7).



**Figura 7:** Tensão-temperatura em função da deformação: (a) taxa de deformação  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , (b) taxa de deformação  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , (c) taxa de deformação  $0,1 \text{ s}^{-1}$  e (d) temperatura em função da deformação.

Avaliando os gráficos tensão-temperatura em função da deformação, para todas as taxas de deformação, as temperaturas compreendidas na região I, apresentaram pequenos aumentos, o que pode ser atribuído às tensões hidrostáticas que promovem as alterações de volume durante a deformação elástica. Embora exista um pequeno aumento na temperatura na região I, em geral o aumento de temperatura foi quase independente da taxa de deformação.

Na região II, fase do encruamento do material, a temperatura aumentou quase linearmente com a redução uniforme da seção transversal dos corpos de prova ao longo do seu comprimento. Para o intervalo entre 0,1 a 0,2 de deformação, a temperatura do aço inoxidável AISI 430 aumentou  $2,7 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e  $7 \text{ °C}$  para as taxas de  $0,01$  e  $0,1 \text{ s}^{-1}$ . De 0,2 de deformação até a resistência máxima do material (aproximadamente 0,25 de deformação para todas as taxas), os aumentos de temperatura continuaram lineares, porém, com um percentual maior:  $8 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ,  $25 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $35 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ . A partir da resistência máxima a deformação plástica torna-se instável, a redução da seção deixa de ser uniforme, dando início à formação da estrição difusa nos corpos de prova. Nessa etapa, a termografia por infravermelho revelou claramente um aumento mais acentuado na temperatura para todas as taxas de deformação. Segundo GOLASINSKI *et al.* [19], na região III, a deformação progride de forma acelerada com o aumento da taxa de deformação e o processo tende a ser adiabático. Sob tais condições, a geração de calor devido à deformação, principalmente após a estrição localizada, foi mais rápida que a difusão de calor em toda a amostra, resultando em um aumento de temperatura substancialmente maior para os experimentos com taxas de deformação mais altas. A geração adiabática de calor na estrição localizada também foi maior na região da fratura (Figura 7(d)):  $77,5 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  e  $170,8 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  e  $187,5 \text{ °C}$  para a taxa de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ .

#### 4. CONCLUSÕES

A aplicação da técnica da termografia por infravermelho para a medição do gradiente de temperatura do aço inoxidável AISI 430, submetido a esforços trativos com diferentes taxas de deformação, mostrou-se bastante promissora, uma vez que, foi capaz de registrar os gradientes térmicos nos regimes elástico e plástico e na região de fratura dos corpos de prova. No regime elástico (deformações reversíveis), o aumento da temperatura foi desprezível para todas as taxas de deformação. No regime plástico, onde há o encruamento do material, observou-se a influência das taxas de deformação mais elevadas ( $0,01$  e  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) quando comparadas com a taxa de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  no aumento da temperatura, principalmente após a resistência máxima do aço inoxidável AISI 430 ser exercida. Desde a formação da estrição localizada até a fratura dos corpos de prova, o aumento na temperatura foi dependente do aumento da taxa de deformação.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio à realização deste trabalho.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BANABIC, D., *Sheet metal forming processes*, 2<sup>a</sup> ed., Berlin. Springer-Verlag. 2010.
- [2] KLOCKE, F., *Manufacturing processes 4: forming*, 1<sup>a</sup> ed., Berlin. Springer-Verlag. 2013.

- [3] ALTAN, T., TEKKAYA, E., *Sheet metal forming: fundamentals*, 1<sup>a</sup> ed., ASM International. 2012.
- [4] DIETER, G.E., *Mechanical metallurgy*, 3<sup>a</sup> ed. 1986.
- [5] HOSFORD, W., CADDELL, R., *Metal forming: mechanics and metallurgy*, 3<sup>a</sup> ed., Cambridge University. 2011
- [6] BAGAVATHIAPPAN, S., LAHIRI, B.B., SARAVANAN, T., *et al.*, “Infrared thermography for condition monitoring – A review”, *Infrared Physics & Technology*, v. 60, pp. 35-65. 2013.
- [7] PIECZYSKA, E., GOLASINSKI, K., MAJ, M., *et al.*, “Yielding and strain localization effects in gum metal – a unique Ti alloy – investigated by digital image correlation and infrared thermography”, *Materialstoday: Proceedings*, v. 12, pp. 235-238, 2019.
- [8] VILLAR, M., GARNIER, C., CHABERT, F., *et al.*, “In-situ infrared thermography measurements to master transmission laser welding process parameters of PEKK”, *Optics and Lasers in Engineering*, v. 106, pp. 94-104, 2018.
- [9] WILBURN, K., “Temperature profiles observed in tensile specimens during physical test”, *Mater. Eval.*, v. 35, pp. 28-31. 1977.
- [10] HUANG, Y., XU, J., SHIH, C.H., “Application of infrared technique to research on tensile test”, *Mater. Eval.*, v.38, pp. 76-79. 1980.
- [11] SACHEV, A.K., HUNTER, J. E., “Thermal effects during uniaxial straining of steels”, *Metallurgical Transactions*, v. 13A, pp. 1063-1067. 1982.
- [12] JUAN, M.S., MARTÍN, O., SANTOS, F.J., *et al.*, “Application of thermography to analyze the influence of the deformation speed in the forming process”, *Procedia Engineering*, v. 63, pp. 821-828. 2013.
- [13] HANEEF, T., LAHIRI, B.B., BAGAVATHIAAPPAN, S., *et al.*, “Study of the tensile behavior of AISI type 304 stainless steel using acoustic emission and infrared thermography techniques”, *Journals of Materials Research and Technology*, v. 4, pp. 241-253. 2015.
- [14] SHARKEEV, Y.P., VAVILOV, V.P., BELYAVSKAYA, O.A., *et al.*, “Analyzing deformation and damage of VT0,017-0 titanium in different structural states by using infrared thermography”, *J. Nondestruct. Eval.*, v. 35, pp. 42-47. 2016.
- [15] MARTINEZ, J.A.R., PESCI, R., RUSINEK, A., “Experimental study on the martensitic transformation in AISI 304 steel sheets subject to tension under wide ranges of strain rate at room temperature”, *Mat. Sci. Eng*, v. 528, pp. 5974-5982. 2016.
- [16] ZHANG, Y., GUO, J., LI, Y., *et al.*, “A comparative study between the mechanical and microstructural properties of resistance spot welding joints among ferritic AISI 430 and austenitic AISI 304 stainless steel”, *J. Mater. Res. Technol.*, v. 9, pp. 574-583, 2020.
- [17] ROBISON, A.F., DULIEU-BARTON, J.M., QUINN, S., *et al.*, “Paint coating characterization for thermoelastic stress analysis of metallic materials”, *Meas. Sci. Technol.*, v. 21, pp. 085502. 2010.
- [18] MADIVALA, M., BLECK, W., “Strain rate dependent mechanical properties of TWIP steel”, *The Minerals, Metals & Materials Society*, v. 71, pp. 11291-1302. 2018.
- [19] GOLASINSKI, K.M., PIECZYSKA, E.A., STASZCZAK, M., *et al.*, “Infrared thermography applied for experimental investigation of thermomechanical couplings in Gum Metal”, *QIRT J.*, v. 14, pp. 226-233. 2017.

**ORCID**

Vinícius Melo Cangussu	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3859-4559">https://orcid.org/0000-0002-3859-4559</a>
Diogo Azevedo de Oliveira	<a href="https://orcid.org/0000-0001-9737-4911">https://orcid.org/0000-0001-9737-4911</a>
Alexandre Mendes Abrão	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2015-4077">https://orcid.org/0000-0003-2015-4077</a>
Frederico de Castro Magalhães	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2406-4407">https://orcid.org/0000-0003-2406-4407</a>
Haroldo Béria Campos	<a href="https://orcid.org/0000-0002-9258-0019">https://orcid.org/0000-0002-9258-0019</a>