

Estudo da evolução do encruamento e das deformações do aço AISI 430 após estampagem

Helbert Stéfano Goulart Francisco ^{1*} 

Wellington Lopes ¹ 

Elaine Carballo Siqueira Corrêa ¹ 

Resumo

A estampagem é um processo de conformação mecânica capaz de gerar uma variada gama de produtos, desde artefatos simples presentes no uso diário, como dobradiças e utensílios domésticos assim como componentes complexos de estruturas e chassis aplicados no setor automotivo. Neste contexto, o estudo do encruamento e da distribuição da deformação são informações essenciais para a escolha de materiais, para aplicações específicas, de modo a evitar a ocorrência de defeitos e fraturas. O estudo do encruamento auxilia também no entendimento de diversos fenômenos metalúrgicos que surgem durante a conformação mecânica, além de contribuir para a redução de diferentes tipos de defeitos em produtos metálicos. Considerando essa abordagem, este trabalho realizou o estudo da evolução do encruamento e a distribuição da deformação de dois aços inoxidáveis ferríticos AISI 430, classificados como tipos A e F com uso do ensaio de cisalhamento e do método de simulação numérica por elementos finitos. Os resultados indicaram a combinação de esforços mecânicos durante a estampagem, a tendência de amaciamento dos aços devido à ocorrência do efeito Bauschinger e a ausência de transientes na taxa de encruamento.

Palavras-chave: Estampagem; AISI 430; Encruamento.

Study of work hardening evolution and deformation of AISI 430 stainless-steel after stamping

Abstract

The stamping is a mechanical forming process used for generating a wide range of products, since simple components used such as folding doors and household items up to automotive products. In this context, the study of the work-hardening and the deformation path are essential information to select materials for specific applications, avoiding occurrence of defects and fracture. The work hardening study helps on the understanding of several metallurgical phenomena detected during forming, beyond to contribute to reduce the incidence of defects in metals products. Considering this approach, this work carried out the study of the evolution of the work hardening and the strain path of two ferritic AISI 430 stainless steels, classified as types A and F with shearing tests and numeric simulation by finites elements method. The results indicated the combination of mechanical efforts during the stamping process and the tendency of softening for both steels due to the Bauschinger Effect and the absence of work-hardening rate transients.

Keywords: Sheet metal forming; AISI 430 stainless steel; Work-Hardening.

1 Introdução

Os produtos fabricados a partir da estampagem dos aços inoxidáveis AISI 430 são bem variados, incluindo desde artefatos domésticos até automotivos. Esses setores têm cada vez mais solicitado produtos com características

dimensionais e mecânicas restritas, desencadeando a necessidade de melhoria no desenvolvimento dos produtos e dos processos de fabricação. No entanto, a conformação de diversos tipos de materiais, em especial, os aços,

¹Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: helbertgoulart@hotmail.com



ocasiona diversos problemas, como o retorno elástico em peças estampadas [1], reduzindo a exatidão dimensional de produtos estampados [2].

O processo de estampagem de chapas metálicas geralmente envolve operações múltiplas [3], as quais o tipo de deformação envolvido no plano da chapa pode exibir, por exemplo, uma condição de estiramento-compressão e estiramento duplo, a partir das mudanças no modo de deformação imposta, ou seja, das alterações na trajetória de deformação, que são capazes de modificar a conformabilidade de uma chapa de aço. Essas mudanças podem ser graduais em uma operação simples ou também mais severas em operações múltiplas [4].

A investigação das respostas de um material quando submetido a diferentes esforços mecânicos é de extrema importância para evitar a ocorrência de defeitos ou falhas [5]. Diversas são as variáveis que auxiliam na avaliação da estampabilidade de um material, como exemplo, pode-se citar a necessidade do conhecimento da evolução do encruamento de um material e principalmente, a habilidade desta propriedade em postergar o início da instabilidade plástica [6]. Considerando este aspecto, o conhecimento das variáveis que afetam a ocorrência de transientes na taxa de encruamento é imprescindível para garantir a distribuição homogênea da deformação plástica de um material durante uma operação de conformação mecânica [7].

Existem diversas ferramentas capazes de prever o comportamento mecânico de um material quando submetido à uma determinada condição de deformação plástica, como o traçado das curvas limite de conformação, CLC, ou diagrama limite de conformação, além do uso da simulação por elementos finitos. Considerando essa necessidade da previsão do comportamento mecânico para diversas aplicações de produtos estampados, este trabalho propõe a análise do encruamento e da distribuição de deformação plástica de um produto estampado confeccionado a partir de aços inoxidáveis ferríticos mediante o uso de simulação numérica e do ensaio de cisalhamento [8].

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho foram chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430, dos tipos A e F, laminadas a frio (estado como recebido) com espessura de 1,0mm e 1,2mm e tamanho de grão igual a 14 μ m e 18 μ m, respectivamente. A composição química pode ser

observada na Tabela 1. Para execução deste estudo foram utilizados 5 chapas de cada aço para confecção de 5 produtos estampados e 5 cinco amostras para cada região investigada dos materiais estampados.

2.2 Estampagem

A rota de estampagem consistiu na estampagem de um produto mediante a combinação das operações de dobramento e de repuxo para a confecção de um produto estampado em um único golpe, em uma prensa hidráulica industrial Rio Negro, com capacidade de 250 toneladas. Em seguida, como descrito na Figura 1, foram retirados corpos de prova para a realização do ensaio de cisalhamento em diferentes regiões para a medição das propriedades mecânicas de um objeto estampado que é parte de um componente utilizado na composição estrutural de peças para o setor automotivo, cuja autorização de divulgação da imagem foi concedida pelo fabricante [9].

Para executar a medição da deformação plástica do produto estampado foi necessário realizar a impressão de uma malha de grades de círculos ao longo do corpo das chapas, antes da estampagem, utilizando um instrumento de marcação de chapas de aço, Erichsen 18V, com rolos de marcação manual, sendo a marcação das chapas feita com a utilização de telas Erichsen com grades de círculos de 3,0mm de diâmetro. A solução eletroquímica era composta por 4,0 litros de água deionizada, 88,8ml. de ácido clorídrico, 88,8 ml de ácido nítrico, 80g de cloreto de sódio e 71,1g de cloreto de potássio.

As chapas de aço inoxidável foram previamente limpas com álcool líquido 46% e posteriormente imersas em uma solução eletrolítica durante 10 segundos e então colocadas em contato com uma tela com a grade de círculos sobre a chapa e efetuado cinco rolagens de forma leve, sem retorno, com o dispositivo de marcação eletroquímica sobre a tela para permitir a impressão da malha de círculos nos aços AISI 430 tipos A e F, Figura 2.

Após a estampagem das chapas previamente marcadas, os círculos impressos se transformaram em elipses, conforme demonstrado na região ampliada da posição 4 (Figura 3), e então procedeu-se à medição dos diâmetros dos círculos para mensurar a deformação plástica sofrida pelo material estampado. A medição dos círculos foi efetuada em diferentes posições, definidas como sendo os pontos 1, 2, 3 e 4, regiões estas que exibiram sinais da deformação dos círculos, ou seja, a forma dos círculos foi modificada. Dessa forma foram selecionadas as amostras para o ensaio de cisalhamento, retiradas das posições 1, 2 e 4, Figura 3.

Tabela 1. Análise química dos aços AISI 430 tipos A e F

Elemento	Análise química [% p.p]										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
AISI 430 Tipo A	0,05	0,30	0,02	0,00	0,41	0,16	16,14	0,01	0,01	0,02	0,04
AISI 430 Tipo F	0,03	0,24	0,03	0,01	0,32	0,24	16,29	0,06	0,01	0,03	0,04



Figura 1. Detalhes da rota de estampagem.



Figura 2. Processo de criação da malha de círculos nos blanques.

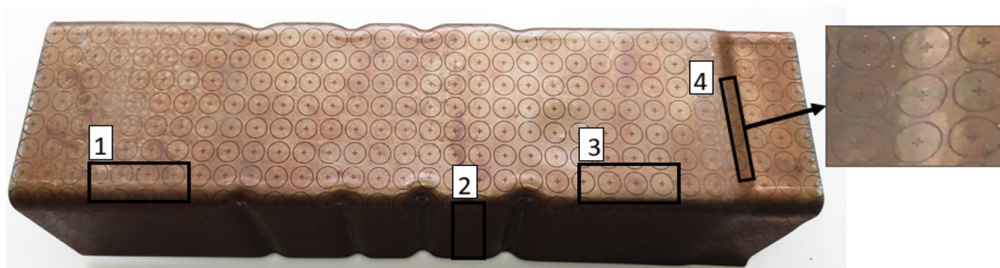


Figura 3. Produto estampado após a marcação eletroquímica. Posições 1, 2, 3 e 4 definidas para a medição dos círculos, por apresentarem sinais de deformação.

Após as medições do diâmetro dos círculos, foram feitos os cálculos das deformações principais, e_1 e e_2 , Equação 1 e, adotando a manutenção do volume da chapa,

obteve-se o valor da deformação na espessura, e_3 , pela diferença dos valores de e_1 e e_2 . Calculou-se também a razão entre as medidas da deformação, β , conforme a Equação 2,

[8], sendo d_1 e d_2 os valores do diâmetro dos círculos ao longo dos eixos X e Y, respectivamente e t_0 e t , os valores da espessura inicial e final da chapa.

$$\varepsilon_1 = 2 \ln \frac{d_1}{d_0} \quad \varepsilon_2 = 2 \ln \frac{d_2}{d_0} \rightarrow \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

Os resultados numéricos para cada razão de deformação calculada (β) foram correlacionados com o tipo de deformação correspondente às posições 1, 2, 3 e 4 da chapa estampada [10].

A simulação por elementos finitos foi utilizada de forma comparativa aos resultados experimentais obtidos. O produto estampado foi simulado com uso do software AutoForm Forming® de elementos finitos por meio do uso de uma malha hexaédrica composta por 325.976 nós e 273.639 elementos, utilizando o método *Mechanical Agressive* para o refino da malha, sendo escolhido o critério de von Mises como modelo para descrição do comportamento plástico dos aços com encruamento isotrópico, adotando ainda critério de dano baseado no traçado da curva limite de estampagem do material.

2.3 Ensaio de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados em amostras retiradas do produto estampado mediante a utilização de um dispositivo desenvolvido para essa finalidade (Figura 4), o qual foi adaptado à uma máquina de ensaios universais Instron, modelo 5582, dotada de sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2*, extensômetro mecânico modelo 2630-100 com abertura de 25mm.

Todos os ensaios de cisalhamento foram feitos sob taxa de deformação de $1 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ com a utilização de corpos de prova confeccionado conforme descrição apresentada por Rauch [9], com a relação entre o comprimento, L, e a largura submetida ao ensaio de cisalhamento, b, de pelo menos 10, para uma amostra com largura total igual a w e espessura de chapa, t, Figura 5. Neste caso, a deformação cisalhante ou angular, γ , e a tensão cisalhante, τ , foram calculadas como descrito nas Equações 3 e 4.

$$\gamma = \Delta L / b \quad (3)$$

$$\tau = F / A_{cis} \quad (4)$$

Sendo ΔL o valor do deslocamento cisalhado do corpo de prova na região de largura b e A_{cis} a área cisalhada (b x L).

A partir dos valores de tensão e deformação cisalhantes foram obtidos os valores de tensão e deformação efetiva de acordo com o critério de von Mises [9,11] e assim obtida a curva de tensão-deformação efetiva e da taxa de encruamento normalizada-deformação efetiva, conforme descrito por Zandrahimi et al. [12], indicando que o início da instabilidade plástica de um material ocorrerá quando a taxa de encruamento, θ , multiplicada pelo inverso da tensão efetiva for menor que 1.



Figura 4. Dispositivo para ensaio de cisalhamento.

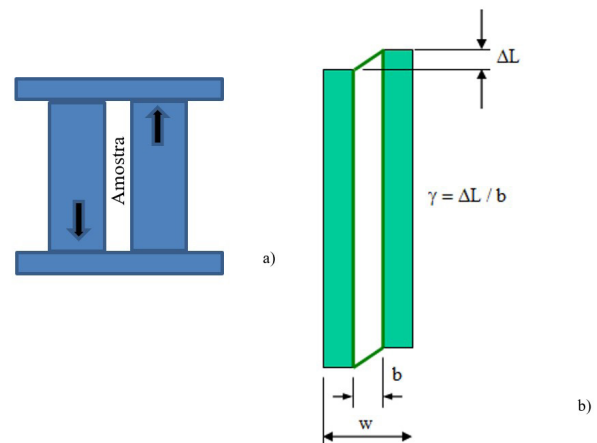


Figura 5. Ensaio de cisalhamento: (a) esquema do dispositivo e (b) esquema do corpo de prova.

3 Resultados

Na Figura 6 é possível verificar a distribuição da deformação do produto estampado a partir dos resultados obtidos por simulação numérica pela deformação maior, e_2 , e deformação menor, e_1 , não sendo percebida a presença de nenhum ponto crítico, ou seja, todos os pontos ficaram abaixo da curva limite de conformação. De modo geral, percebe-se ainda que a deformação plástica experimentalada pelo produto estampado se concentrou em valores abaixo de 0,02% (padrão de cor cinza na escala de deformação da Figura 5), sendo os maiores valores de deformação detectados nos pontos de dobra indicado pelas cores verde (zona de deformação segura) e roxa (zona de estiramento), alcançando o canto inferior dobrado aproximadamente 0,10 (10%) de deformação maior, como assinalado na escala de cores, mas

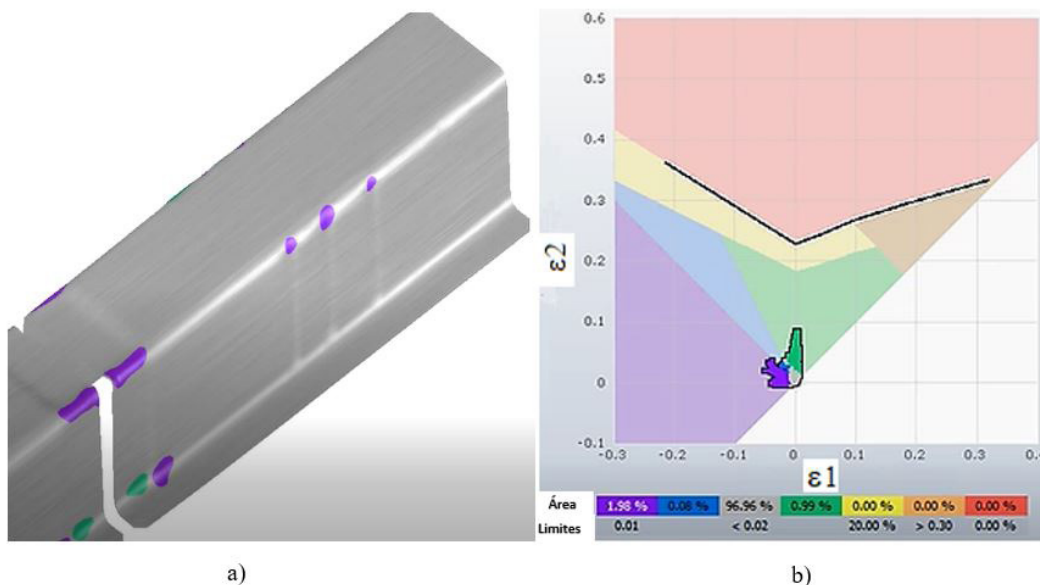


Figura 6. Simulação por elementos finitos da peça estampada: (a) produto e (b) curva CLC.

abrangendo uma área muito pequena, aproximadamente 1% da área da peça estampada.

A partir da medição das grades de círculos antes e após a estampagem, foram obtidos os valores de deformação plástica e a indicação do modo de deformação experimentado [8] pelos aços AISI 430 nas posições 1, 2, 3 e 4 ao longo dos eixos X e Y, sendo o eixo Y o eixo de deformação maior, ϵ_2 , e o eixo X o de deformação menor, ϵ_1 , Figura 7.

A partir da análise da Figura 7 nota-se a presença de uma combinação de modos de deformação plástica, com predominância do estiramento como indicado nos círculos 1 e 2 da Figura 7(a) [13]. No entanto, nos pontos 3 e 4, existem ainda outros dois modos de deformação, mesmo que pouco relevante, de compressão biaxial (círculo 3), além do estiramento, agora, ao longo do eixo X (círculo 4). De modo análogo ao detectado para a simulação numérica, a magnitude da deformação plástica identificada em todos os pontos analisados foi pequena.

Quanto à razão das deformações, β , Figura 7(b), nota-se a presença do estiramento na posição 1, a tendência de deformação no estado plano nas posições 2 e 4 e uma indefinição na posição 3 devido ao valor reduzido de deformação que ambos os aços experimentaram nesta região, com a tendência de um estado predominado pela compressão [8].

O gráfico de superfícies mostrado na Figura 8 exibe com maior simplicidade a maior capacidade de deformação plástica do aço AISI 430, tipo F, Figura 8(b), sendo isso indicado pela maior extensão da superfície representativa das deformações nos três eixos da chapa, comprimento, e_1 , largura, e_2 , e espessura, e_3 , quando comparado com o apresentado pelo aço AISI 430, tipo A, Figura 8(a).

Associando agora a distribuição da deformação com a resposta mecânica exibida pelos dois aços, são exibidas nas Figuras 9 e 10 as curvas de tensão-deformação efetiva

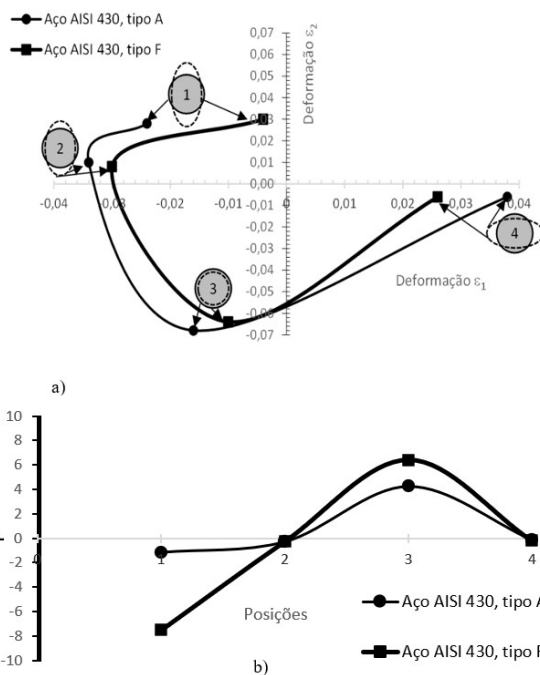


Figura 7. a) Distribuição das deformações ϵ_1 e ϵ_2 para o produto estampado e b) valores β em função posição.

e da taxa de encruamento normalizada-deformação efetiva para as posições 1, 2 e 4, além da condição monotônico, ou seja, o ensaio conduzido nas chapas dos aços AISI 430 tipos A e F, sem terem sofrido a estampagem, para servir como referência à análise da mudança do comportamento mecânico destes aços após a execução da operação de estampagem.

Deve-se destacar que a região 3 não foi analisada pelo fato de não cumprir o requisito de possuir comprimento

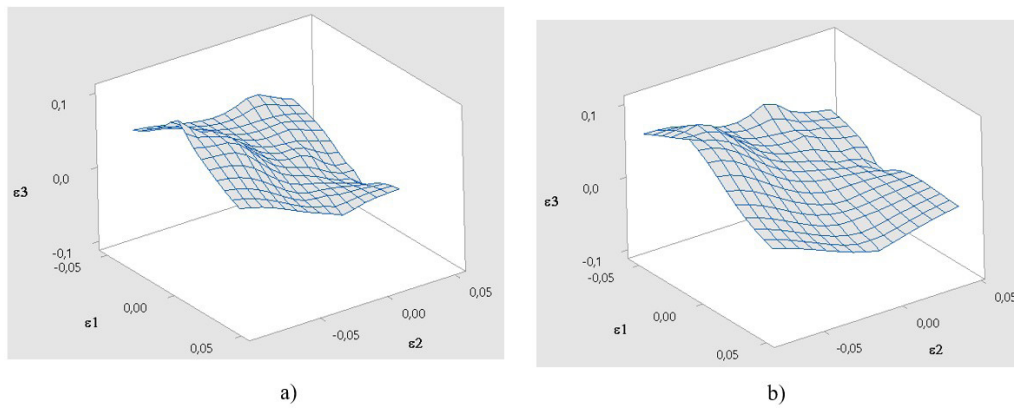


Figura 8. Gráficos de superfície para a distribuição de deformação do aço AISI 430 no estado recebido a) tipo A; b) tipo F.

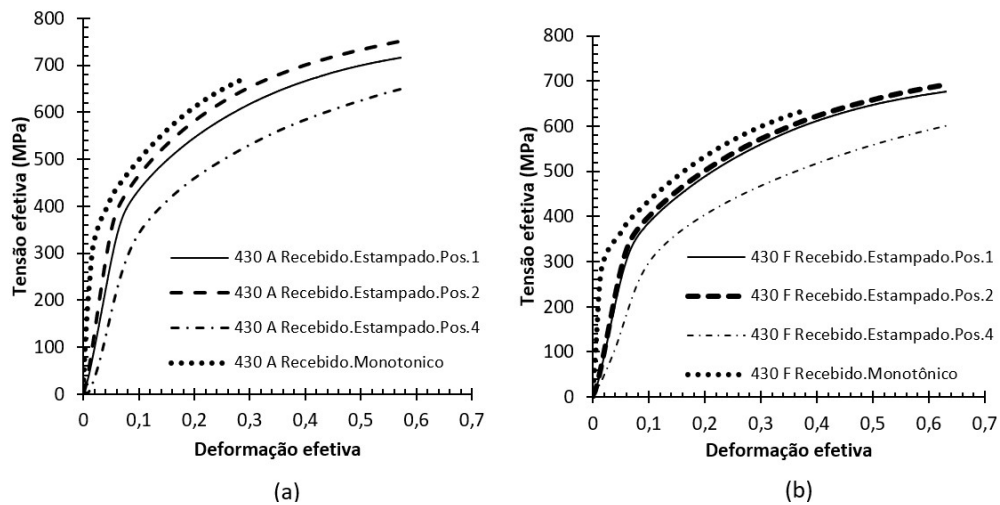


Figura 9. Curvas tensão-deformação efetiva para o produto estampado do aço AISI 430: a) tipo A; b) tipo F.

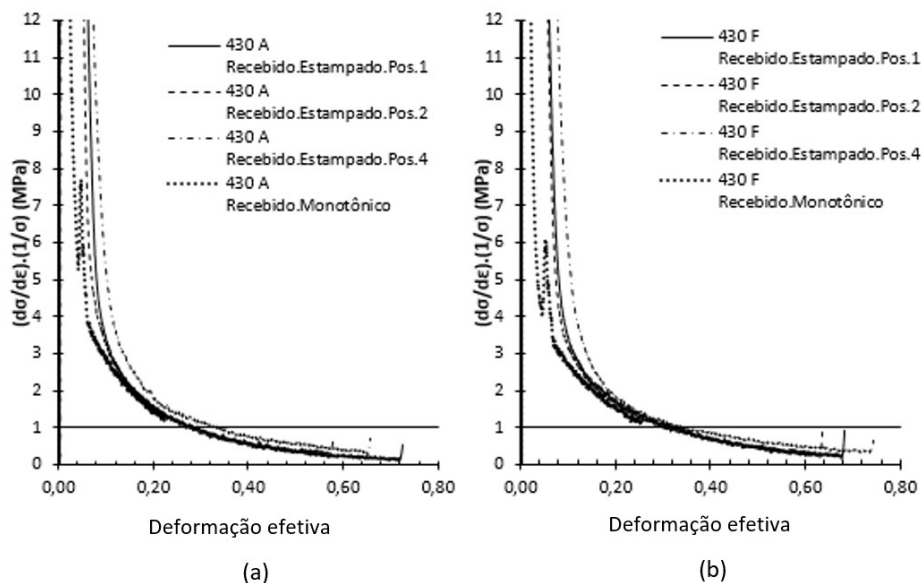


Figura 10. Curvas taxa de encruamento normalizada-deformação efetiva para o produto estampado do aço AISI 430: a) tipo A; b) tipo F.

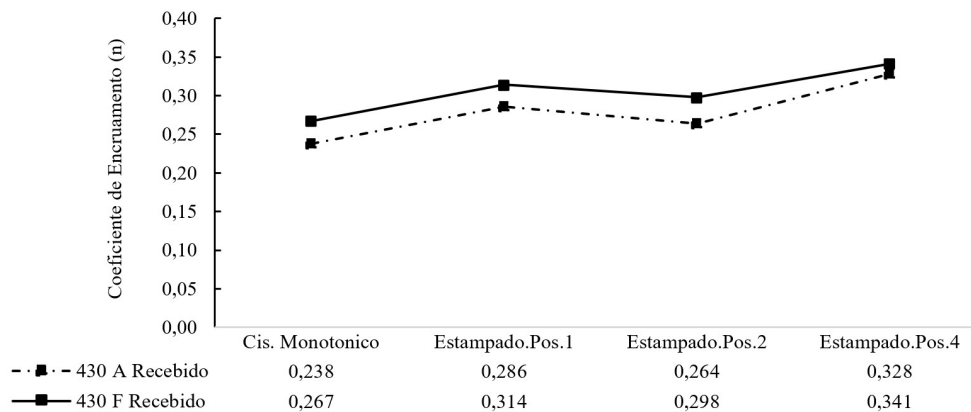


Figura 11. Coeficiente de encruamento das amostras recebidas (monotônico) e estampadas do aço AISI 430 tipos A e F para as posições 1, 2 e 4 do produto estampado.

mínimo para permitir a distribuição homogênea no ensaio de cisalhamento [9].

Analisando o comportamento mecânico em geral dos aços AISI 430, pode-se afirmar que o maior valor para o tamanho de grão do aço tipo F foi suficiente para reduzir ligeiramente a resistência mecânica deste aço quando comparado ao tipo A, e ao pequeno aumento da ductilidade, sendo isso correlacionado com os maiores valores de coeficiente de encruamento que ocasionaram o aumento da ductilidade do aço tipo F antes do início da instabilidade plástica, como registrado pelo cálculo dos valores deste parâmetro mostrado na Figura 11 [14].

Verifica-se ainda o amaciamento dos aços AISI 430 tipos A e F quando comparado com o estado como recebido, ou seja, na condição anterior à estampagem.

Tal resultado pode ser correlacionado com a ocorrência do Efeito Bauschinger, que consiste na ação de tensões reversas decorrentes da combinação de esforços opostos (tração e compressão) que tendem a reduzir a tensão necessária ao início da deformação plástica devido às mudanças na subestrutura de discordâncias decorrentes dos esforços de tração e de compressão que tendem a se anular, comprometendo a criação de uma subestrutura de discordâncias que seja capaz de ocasionar o endurecimento do material no início da deformação plástica [15].

Esse fato traz em evidência a influência do modo e da quantidade de deformação impostos pelo dobramento (deformação plana) na posição 4. Resultados similares foram

encontrados por Morais [7], durante a realização do ensaio de cisalhamento para o estudo do Efeito Bauschinger. Houve o adiamento da instabilidade plástica, observada através dos valores do expoente de encruamento, após o segundo carregamento em cisalhamento direto realizado no experimento.

4 Conclusões

A estampagem dos aços inoxidáveis AISI 430, tipos A e F indicaram:

- a ocorrência de amaciamento dos aços devido à observância do Efeito Bauschinger como sinal da presença de encruamento cinemático;
- a combinação de esforços de tração (estiramento) e compressão, além da tendência de deformação no estado plano por meio da análise da razão das deformações;
- a pequena magnitude de deformação plástica experimentada pelo produto estampado analisado neste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- Mendiguren J, Herrero-Dorca N, Saenz de Argandoña E, Galdos L. Press hardening of alternative materials: conventional high-strength steels. *International Journal of Material Forming*. 2018;11:663-670. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-017-1379-y>.
- Hashemi SJ, Roohi AH. Minimizing spring-back and thinning in deep drawing process of St14 steel sheets. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2022;16(1):381-388. <http://dx.doi.org/10.1007/s12008-021-00816-7>.

- 3 Luo S, Yang G, Lou Y, Xu Y. Prediction of strain path changing effect on forming limits of AA 6111-T4 based on a shear ductile fracture criterion. *Metals*. 2021;11(4):546. <http://dx.doi.org/10.3390/met11040546>.
- 4 Laukonis JV, Ghosh AK. Effects of strain path changes on the formability of sheet metals. *Metallurgical Transactions A*. 1978;9(12):1849-56. <https://doi.org/10.1007/bf02663419>.
- 5 Basak S, Panda SK. Failure strains of anisotropic thin sheet metals: experimental evaluation and theoretical prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;151:356-374.; [cited 2022 October 02]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.065>.
- 6 Bastos AL. Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação. Santa Catarina: Repositório Institucional da UFSC; 2012.
- 7 Morais FLD. Effect of shear direction on work-hardening Evolution of AISI 409 steel under rolling/shearing loading. *Materials Research*. 2022;25:e20210398. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0398>.
- 8 Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. *Mechanics of sheet metal forming*. 2. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann; 2002.
- 9 Rauch EF. The flow law of mild steel under monotonic or complex strain path. *Diffusion and Defect Data, Solid State Data. Part B, Solid State Phenomena*. 1992;23-24:317-333. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.23-24.317>.
- 10 Butcher C, Khameneh F, Abedini A, Connolly D, Kurukuri S. On the experimental characterization of sheet metal formability and the consistent calibration of the MK model for biaxial stretching in plane stress. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;1(287):116887-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116887>.
- 11 Pashazad H, Kharazi M. A peridynamic plastic model based on von Mises criteria with isotropic, kinematic and mixed hardenings under cyclic loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;156:182-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.033>.
- 12 Zandrahimi M, Platias S, Frice D; Barret D, Bate PS, Roberts WT. Effects of changes in strain path on work hardening in cubic metals. *Metallurgical and Materials Transactions*. 1989;20(A):2471-2482. <https://doi.org/10.1007/BF02666682>.
- 13 Lima ACS, Dagostim DK, Zaage LA, Casagrande PAS, Daleffe A. Survey of the forming limit curve of SAE 1006 steel. *Brazilian Journal of Development*. 2022;8(4):31555-31562. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv8n4-575>.
- 14 GVK SS, Tan MJ, Liu Z. Plastic Instability in Co-Cr-Ni-Mo alloy wires drawn with different drawing practices. *Materials Science and Engineering*. 2019;747:80-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.059>.
- 15 Zheng Z, Li R, Zhan M, Yuan G, Zhang H, Lei Y, Balint DS. The effect of strain rate asymmetry on the Bauschinger effect: A discrete dislocation plasticity analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;16:190418. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.107>.

Recebido em: 28 Out. 2022

Aceito em: 29 Maio 2023