

ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO NOS ASPECTOS MACRO E MICROSCÓPICO DO AÇO AISI 430 ESTAMPADO¹

Jaqueline Miranda Silva²
Maria Teresa Paulino Aguilár³
Elaine Carballo Siqueira Corrêa⁴
Wellington Lopes⁴

Resumo

A estampagem dos materiais metálicos pode exibir a formação de imperfeições superficiais e trincas que comprometem a utilização dos diferentes objetos conformados. Dentre os materiais comumente adotados para a estampagem citam-se os aços inoxidáveis ferríticos, por exibirem excelente acabamento superficial e resistência à corrosão adequada ao uso. No entanto, diversas variáveis afetam a resposta desses aços durante uma operação de estampagem, como as variáveis de processo e o arranjo micro e subestrutural desenvolvidos ao longo dessa operação. Diante disso, este trabalho apresenta o estudo dos aspectos macro e microestrutural exibidos pelo aço AISI 430 para diferentes estados iniciais (como recebido, tracionado e calandrado com e sem a condução de tratamento térmico intermediário). Os resultados indicaram que o arranjo microestrutural assumido pelos copos embutidos foi semelhante ao observado no estado como recebido, sendo notado ainda que a deformação plástica por calandragem ocasionou o aparecimento de uma orientação macroscópica preferencial e a formação do fenômeno de "orelhamento". Contudo, para todos os procedimentos de estampagem investigados, não foi observada a formação de trincas no aço inoxidável ferrítico AISI 430.

Palavras-chave: Aço AISI 430; Estampagem e orelhamento.

STUDY OF EFFECT OF THERMOMECHANICAL PROCESSING CONDITIONS ON THE MACRO AND MICROSTRUCTURAL ASPECTS OF AISI 430 STEEL SHAPED

Abstract

The forming of metallic materials could be exhibit superficial imperfections and cracks that hinder the use of different shaped objects. The ferritic stainless steels are a commonly material used in forming operations due to it presents an excellent superficial aspect and corrosion resistance adequate to the different uses. However, many variables affect these characteristics, such as process variables and macro and substructural arrangements developed during a forming operation. This manner, this work presents the study of macro and microstructural aspects exhibited by the AISI 430 ferritic stainless steel for different initial conditions (as received, tensioned and calendered with and without the conduction of an intermediary heat treatment). The results indicated that the microstructural arrangement developed by the shaped cups was similar to that observed in the as received condition, since also detected that the deformation by calendar caused the occurrence of a preferential macroscopic orientation and the presence of earing phenomenon. Nevertheless, for all forming conditions investigated was not observed the occurrence of cracks in the AISI 430 steel.

Key words: AISI 430 steel; Forming and wrinkles.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduanda em Engenharia de Materiais, CEFET, Belo Horizonte, MG, Brasil; jacklinems@yahoo.com.br.

³ Engenheira metalúrgica. Professora, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro mecânico. Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem, principalmente, um percentual mínimo de 11% (em peso) de cromo, sendo que a presença deste elemento garante resistências à oxidação e à corrosão elevadas.⁽¹⁾ Outros elementos de liga podem estar presentes nestes aços, como o níquel, o molibdênio, o nióbio e o carbono. Cada elemento melhora uma propriedade específica nos aços inoxidáveis, como o aumento da resistência mecânica pelo acréscimo de níquel.

O aço AISI 430 é o tipo mais comum de aço inoxidável ferrítico. Apesar de esse aço exibir, para as mesmas condições, valores da tensão limite de escoamento maior e expoente de encruamento menor que outro tipo de aço inoxidável, como os inoxidáveis austeníticos, parâmetros estes considerados essenciais para uma operação de estampagem, este aço é comumente utilizado na fabricação de utensílios domésticos (pias e talheres) e de eletrodomésticos (portas e cabines de fogões, de geladeiras e de máquinas de lavar roupas, por exemplo).

No entanto, para o uso satisfatório desses aços, além das propriedades mecânicas, variáveis metalúrgicas e de processos também são fundamentais para o aproveitamento dos mesmos em operações de estampagem. Neste caso, cita-se o controle da textura de laminação dos aços inoxidáveis ferríticos, a qual influencia, por exemplo, no aspecto macroscópico assumido por esses aços. Neste caso, destaca-se o fato de a textura γ ser considerada a mais adequada para a estampagem⁽²⁾ desses aços. Deste modo, faz-se uso, por exemplo, de mudanças na composição química de modo a promover, dentre outros aspectos, a formação de componentes de recristalização.⁽¹⁾

Além da alteração da composição química dos aços inoxidáveis ferríticos os ajustes adotados para a realização do tratamento térmico de recozimento também afetam a obtenção da maior quantidade de deformação em operações de estampagem ao influenciar o estabelecimento de uma textura apropriada.⁽¹⁾

Com relação às variáveis de processo, tem-se como exemplo as condições de lubrificação, o raio do punção, a folga entre o material e a matriz além da força aplicada pelo prensa-chapas afetam as respostas de um material estampado, como a ruptura, o enrugamento e o fenômeno de orelhamento.^(1,3,4)

Estudos anteriores mostram, por exemplo, que o raio do punção ou da matriz, seguido pelo coeficiente de atrito e pela força aplicada pelo prensa-chapa constituem as variáveis que mais influenciam a variação do valor da espessura do material estampado.^(5,6)

Desta forma, considerando a dependência das respostas apresentadas de uma chapa após as diversas operações de estampagem com parâmetros de processo e metalúrgicos, este trabalho exhibe os aspectos macro e microestruturais apresentados após a estampagem por embutimento do aço inoxidável ferrítico AISI 430. Neste caso, a partir do conhecimento adquirido em outros estudos, fez-se a opção de estampar esse aço em condições críticas, como a ausência de um prensa-chapa, a adoção de tratamento térmico de recozimento e a combinação de esforços mecânicos de modo a investigar a influência dessas variáveis nos arranjos macro e microestrutural além da presença visual de trincas após a conclusão da estampagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Chapas do aço inoxidável ferrítico AISI 430 do tipo 430A foram utilizadas neste trabalho com espessura inicial de 1,2mm, com composição química registrando (% em peso): 16,10Cr, 0,2033Ni, 0,0457C, 0,0156Nb, 0,0196Mo e 0,0005S. Todos os ensaios foram conduzidos na direção de laminação original da chapa, exceto aqueles necessários à identificação da anisotropia do material.

2.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica do material foi feita a partir de ensaios de tração uniaxial até a fratura enquanto a anisotropia das chapas foi identificada a partir da deformação convencional até 0,12 para corpos de prova de tração retirados a 0°, a 45° e a 90° em relação à direção de laminação original da chapa.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universais Instron 5582 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 2 e extensômetro mecânico (tipo agulhas) com 25mm de abertura e célula de carga com capacidade de 100 kN. A taxa de deformação inicial foi de 0,001s⁻¹, sendo feito o uso de corpos de prova com seção transversal retangular de acordo com as recomendações previstas pela norma ASTM E-8.

2.3 Calandragem

A calandragem das chapas do aço AISI 430 foi executada em uma calandra mecânica Imac com a utilização de cilindros de trabalho com diâmetro de 120 mm sendo o material calandrado em ambas as faces.

2.4 Tratamento Térmico e Caracterização Microestrutural

O tratamento térmico de recozimento foi realizado com o objetivo de restituir a ductilidade do aço AISI 430 que estava previamente deformado (encruado por laminação a frio), assim como para avaliar a influência dessa operação na estampabilidade do aço AISI 430. Deste modo, este tratamento térmico foi conduzido em um forno do tipo mufla Brasimet a 900°C e tempo de encharque de 25 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno.

Após condução dos ciclos de processamento mecânico descritos a seguir fez-se a análise microestrutural do aço AISI 430 mediante o lixamento e polimento mecânicos com posterior ataque com reativo químico Vilela modificado (1 g de ácido pícrico, 5 mL de ácido clorídrico com 100 mL de álcool etílico).

2.5 Estampagem

Após o corte dos blanques, o material foi estampado em uma prensa mecânica por acionamento de prato *Gutmann* sem sistema de capacitação de dados e com capacidade de aplicação de carga de até 40.000 Kgf, mediante a utilização de um punção (Figura 1a), e de uma matriz com formato de um copo (diâmetro de 80 mm), Figura 1b.

A estampagem dos copos foi feita com um único golpe e sem o uso de prensa-chapas, abandonado o cutelo de uma altura de 300 mm, sendo o procedimento realizado sem a utilização de lubrificantes.

A estampagem foi realizada em três rotas de processamento, sendo ela após: o estado como recebido, o tracionamento seguido de calandragem e o recozimento seguido de tracionamento e calandragem.

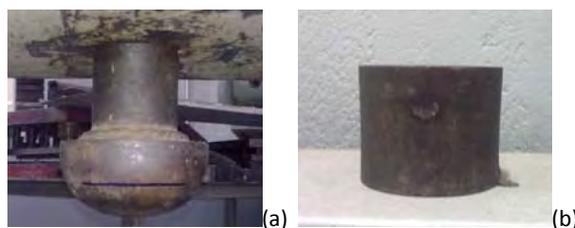


Figura 1. (a) punção e (b) matriz usados para a estampagem do aço AISI 430.

A estampagem foi realizada para diferentes condições do material:

- no estado inicial do material (estado como recebido ou laminado);
- após a pré-deformação em tração (deformação convencional de $e = 0,019$) seguido por calandragem ($e = 0,164$) sem o encurvamento da chapa, com deformação convencional total de 0,183; e
- após a realização do tratamento térmico de recozimento no material pré-deformado em tração ($e = 0,014$) e em calandragem ($e = 0,164$), com deformação convencional total de 0,178.

Após cada operação de estampagem foram retiradas amostras para a análise microestrutural e do aspecto superficial em função das condições de processamento aplicadas ao material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Mecânica

O resumo das propriedades mecânicas exibidas pelo aço AISI 430 no estado como recebido é apresentado na Tabela 1 a partir da condução do ensaio de tração e do traçado da curva de tensão-deformação convencional apresentada na Figura 2.

Com relação ao estudo da anisotropia do aço AISI 430 no estado como recebido a Tabela 2 fornece a relação dos fatores de anisotropia obtidos após a conclusão dos ensaios de tração.

Tabela 1. Principais propriedades mecânicas do aço AISI 430 no estado como recebido

Material	Tensão limite de escoamento LE (MPa)	Tensão limite de resistência à tração, LRT (MPa)	Alongamento uniforme, AU	Coeficiente de encruamento, n
AISI 430	358	526	18,5%	0,171

As propriedades mecânicas exibidas pelo aço AISI 430 em termos de resistência mecânica, de ductilidade e de anisotropia ΔR (próximo de zero) e R_m (maior que a unidade), destacam o uso desse aço para uma condição de estampagem.⁽¹⁾

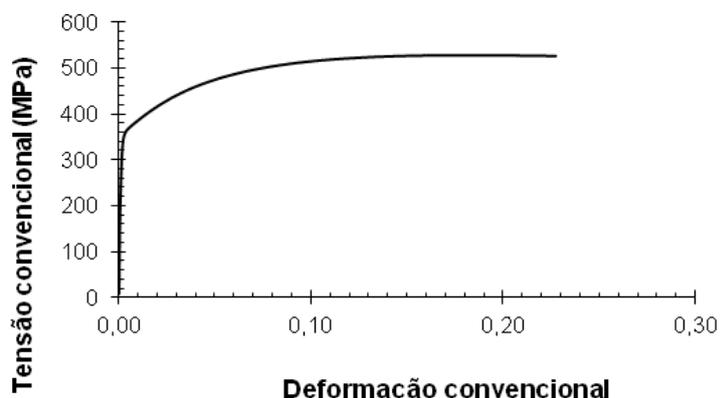


Figura 2. Curva tensa-deformação convencional apresentada pelo aço AISI 430 no estado como recebido.

Tabela 2. Fatores de anisotropia identificados para o aço AISI 430 no estado como recebido

R_{0°	R_{45°	R_{90°	R_m	ΔR
0,984	1,078	1,307	1,112	0,067

3.2 Caracterização Microestrutural

3.2.1 Estado como recebido

A Figura 3 mostra o aspecto microestrutural assumido pelo aço AISI 430 no estado como recebido obtido por microscopia óptica, MO. É possível notar os grãos ferríticos (tamanho de grão igual a $10,56 \mu\text{m}$) ligeiramente alongados devido à condição como recebido deste aço ser proveniente de uma operação de laminação, além da presença de contaminações provenientes da preparação micrográfica.

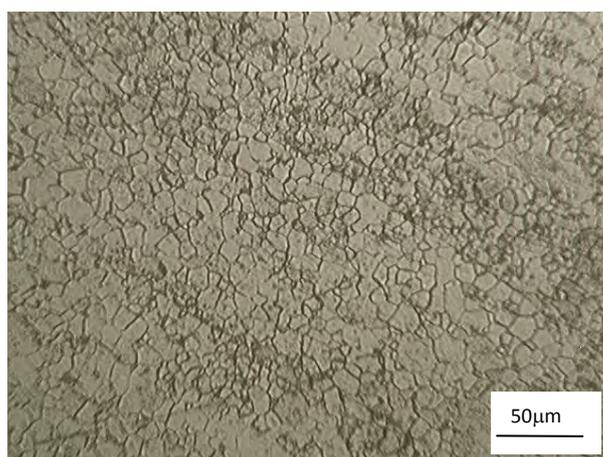


Figura 3. Fotomicrografia do aço AISI 430 no estado como recebido, MO.

3.2.2 Material estampado

A microestrutura do material estampado diretamente, sem nenhum processamento anterior a essa operação, figura 4, mostra que a orientação dos grãos detectada no estado como recebido do aço AISI 430 foi parcialmente removida com a condução da operação de estampagem, sendo isso relacionado ao fato de essa operação envolver a combinação de esforços mecânicos.

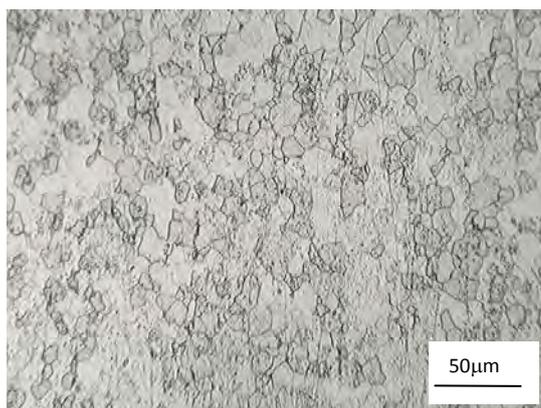


Figura 4. Fotomicrografia do aço AISI 430 estampado sem processamento prévio, MO.

O aspecto macroscópico do aço AISI 430 antes e após a estampagem é mostrado na Figura 5. Percebe-se que o mesmo não apresentou evidências visuais da presença de problemas comuns na estampagem de chapas, como trincas, embora seja possível observar o início do desenvolvimento do fenômeno “orelhamento” (seta), sendo isso relacionado com o fato de a estampagem ter sido feita sem o uso de um prensa-chapa, como previsto em estudos anteriores.⁽⁴⁾

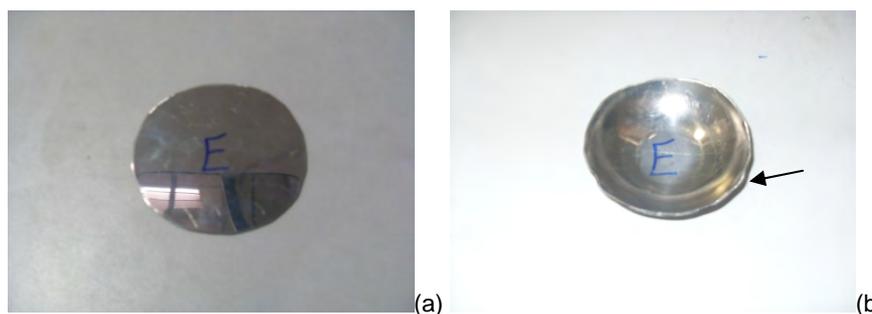


Figura 5. Fotografias do blanque do aço AISI 430 antes da estampagem e (b) do copo estampado sem processamento prévio em laboratório.

3.2.3 Rota tração/calandragem/estampagem (com e sem tratamento térmico prévio)

A Figura 6 revela que a combinação e o aumento da quantidade de deformação plástica decorrente dos esforços mecânicos de tração, de calandragem e daqueles envolvidos na operação de estampagem do aço AISI 430 pouco modificaram a orientação preferencial dos grãos como havia sido percebido no estado como recebido deste aço inoxidável ferrítico.

No entanto, quando se compara o aspecto macroscópico do material estampado, figura 7, nota-se a heterogeneidade maior quanto à orientação das bordas do copo estampado e a presença de indícios de outra irregularidade superficial, as estrias de estampagem (vide círculo, Figura 7b) devido à ausência do prensa-chapas que equilibra as tensões compressivas responsáveis por esse aspecto macroscópico.⁽¹⁾

A presença de estrias de estampagem, *roping*, é comum nos aços inoxidáveis ferríticos para as condições de estampagem extremas adotadas neste trabalho (ausência de prensa-chapas e de lubrificantes), além da própria heterogeneidade da orientação cristalográfica assumida por este material em função das condições de solicitação mecânica, variável esta não investigada neste trabalho.⁽⁶⁾



Figura 6. Fotomicrografia do aço AISI 430 tracionado ($e = 0,019$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado, MO.

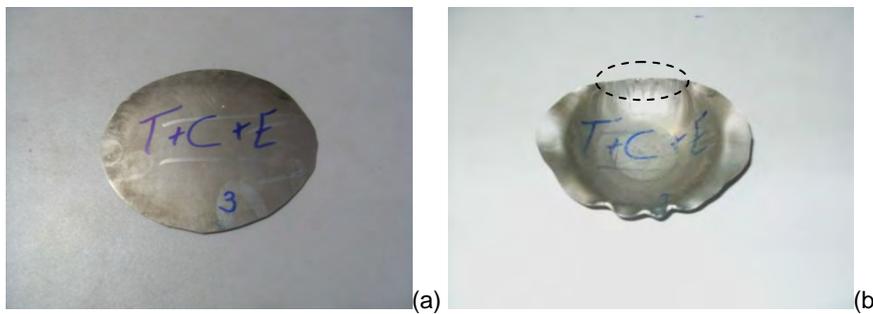


Figura 7. Fotografias do aço AISI 430: (a) no estado como recebido e (b) tracionado ($e = 0,019$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado.

Diante do exposto, o fato do material ter sofrido maior quantidade de deformação plástica intensificou os efeitos provocados pela anisotropia e pela ausência do uso do prensa-chapas na estampagem do aço AISI 430.

A execução do tratamento térmico anterior ao processamento mecânico combinado do aço AISI 430 promoveu apenas um aumento ligeiro do tamanho de grão deste material quando se compara as Figuras 8 e 3.

Como previsto, a execução do tratamento térmico de recozimento anterior à condução dos esforços mecânicos adotados na pré-deformação do aço AISI 430 não alterou a formação do orelhamento (Figura 9), uma vez que a principal variável relacionada ao aparecimento dessa imperfeição superficial é de processo (raio do punção e da matriz, força do prensa-chapas e atrito).⁽³⁻⁴⁾



Figura 8. Fotomicrografia do aço AISI 430 recozido (900°C , 20 min), tracionado ($e = 0,014$), calandrado ($e = 0,164$) e estampado, MO.

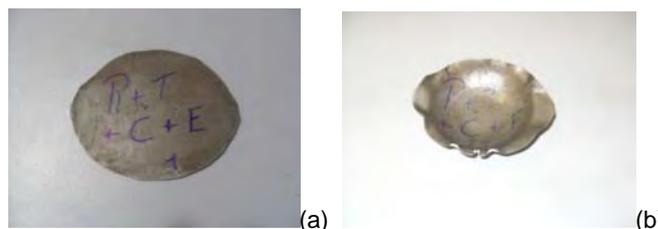


Figura 9. Fotografias do aço AISI 430: (a) no estado como recebido e (b) recozido (900°C, 20 min), tracionado ($\epsilon = 0,014$), calandrado ($\epsilon = 0,164$) e estampado.

4 CONCLUSÕES

A estampagem de um copo simples confeccionado a partir do aço AISI 430 para diferentes esforços mecânicos usados na pré-deformação (tração e calandragem), com a ausência e a execução de tratamento térmico previa em uma matriz sem uso de prensa-chapa e sem lubrificação indicaram:

- arranjo microestrutural semelhante em todos os casos estudados;
- a tendência de orientação dos grãos com a aplicação do esforço mecânico de tração e calandragem;
- a formação do fenômeno de “orelhamento” para as rotas de processamento que fizeram uso do esforço de calandragem com ou sem a condução de tratamento térmico de recozimento anterior ao processamento mecânico de tração e de calandragem;
- a ausência de trincas após a estampagem do aço AISI 430 para todas as condições de processamento investigadas neste trabalho; e
- a tendência para o desenvolvimento de estrias de estampagem para o material tracionado, calandrado e estampado.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 FERREIRA FILHO, A.F., HERRERA, C., LIMA, N.B., PLAUT, R.L., PADILHA, A.F. Evolução da textura cristalográfica de chapas de aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 430 durante laminação a frio, recozimento e estampagem. *REM: R. Esc. Minas*, v. 61, n.2. p. 151 – 158, (2008).
- 2 ASENSIO, J., ROMANO, G., MARTINEZ, V.J., VERDEJA, J.I., PERO-SANZ, J.A. Ferritic steels optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing. *Materials Characterization*, v. 47, p. 119 – 127, (2001).
- 3 FERESHTEH-SANIEE, F., MONTAZERAN, M.H. A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, v. 1-3, p. 555 – 561, (2003).
- 4 COLGAN, M., MONAGHAN, J. Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 132, p. 35 – 41, (2003).
- 5 PADMANABHAN, R., OLIVEIRA, M.C., ALVES, J.L., MENEZES, L.F. Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 43, p. 1062 – 1067, (2007).
- 6 OLIVEIRA, T.R., CUNHA, M.A., GONÇALVES, I.N. Estriamento (roping) em aços inoxidáveis ferrítico AISI 430 estabilizados ao nióbio. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 5, n. 3, p. 150-155, (2009).