

DETERMINAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO AISI 409 POR MEIO DA TÉCNICA DOS CINCO PUNÇÕES¹

Hugo Rodrigues Magalhães²
Rodrigo Nogueira de Oliveira³
José Carlos de Lacerda⁴
Reny Angela Renzetti⁵

Resumo

O Trabalho tem por objetivo estudar a estampabilidade do aço inoxidável ferrítico AISI 409 laminado a frio. Este aço é destinado a aplicações no sistema de exaustão de automóveis, pás de exaustores, onde muitas vezes é submetido a um processo de estampagem. Do ponto de vista experimental, foram confeccionados a matriz e os punções para o estudo. A estampabilidade do aço foi avaliada pela técnica dos cinco punções e obtida a razão limite de estampagem do material. O resultado foi comparado com os descrito na literatura para aços inoxidáveis.

Palavras-chave: Aço 409; Estampagem; Técnica dos cinco punções.

DETERMINING THE STAMPABILITY OF STEEL AISI 409 THROUGH THE TECHNIQUE OF FIVE PUNCTURES

Abstract

This work has the objective to study the stampability of ferritic stainless steel AISI 409 cold laminated. This steel is intended for applications in the automobile's exhaust system, exhaust blades, where often it submitted a process of stamping. From the experimental viewpoint, the array and the punctures were fabricated for the study. The stampability of steel was assessed by technique of five punctures and obtained the ratio limit stamping material. The result was compared with those described in the literature for stainless steels.

Key words: Steel 409; Stamping; Technique of five punctures.

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

² *Graduando, Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, MG, Brasil.*

³ *Graduando, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, MG, Brasil.*

⁴ *Professor Mestre, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, MG, Brasil.*

⁵ *Professora Doutora, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados em diversos setores da indústria. Eles são indicados para aplicações que exijam uma boa resistência a corrosão e apresentam uma boa relação custo/benefício.^(1,2) Comparando-os com os aços carbono, o tempo de vida útil dos aços inoxidáveis ferríticos é maior, o que compensa seu custo mais elevado. Porém quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos o custo é menor, o que os torna mais atrativos. Uma das aplicações em desenvolvimento para o aço AISI 409, um aço inoxidável ferrítico, é no sistema de exaustão de carros.⁽³⁾ A aplicação do aço em pás de exaustores em túneis também está sendo desenvolvida.⁽⁴⁾ Além da resistência à corrosão, o aço AISI 409 apresenta boa resistência mecânica em temperaturas mais elevadas. O aço também tem a vantagem de poder ser facilmente conformado. Esta característica permite obter peças com geometria mais complexas por meio de estampagem.⁽⁵⁾

O processo de estampagem consiste em transformar uma chapa plana, geratriz, em um corpo cilíndrico ou cônico (formato similar a um copo). A transformação da geratriz é um processo de conformação que envolve esforços de compressão e tração. Uma das grandes vantagens da estampagem é a redução de custo na fabricação. Isto se deve principalmente pela redução na quantidade de matéria prima empregada e pela baixa necessidade de processos de usinagem.^(5,6) Uma técnica que possibilita avaliar a estampabilidade com uma combinação de deformações de estiramento e embutimento profundo foi desenvolvida, em 1997, pelo alemão Roland Henning. A técnica, que é relativamente nova se comparada ao processo de estampagem, é conhecida como a técnica dos cinco punções e é uma adaptação do ensaio Swift. Nesta técnica são utilizados cinco punções com geometrias que variam de um formato cilíndrico até um formato elíptico. A estampabilidade de um dado material pode ser utilizada como critério de seleção de materiais em aplicações que envolvam a Engenharia Mecânica.⁽⁷⁻⁹⁾

O Trabalho consiste, primeiramente, em obter a matriz e os punções para a técnica de estampagem dos cinco punções. A razão limite de estampagem do aço inoxidável ferrítico AISI 409 será obtida. Os resultados serão comparados com os encontrados na literatura para aços inoxidáveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O aço que está sendo investigado neste trabalho é um aço inoxidável ferrítico AISI409, laminado a frio sofrendo redução em 70%, chegando a 1,60 mm de espessura. A composição química do aço é apresentada na Tabela 1. Da chapa laminada foram retiradas amostras para tratamento térmico em diferentes temperaturas por 15 min. As amostras foram preparadas metalograficamente e foram realizadas medidas de microdureza Vickers com carga de 200 gf. O aço foi tratado termicamente em 800°C por 15 min para a realização dos ensaios de estampagem.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI409 (% mássica)

C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni	Ti	Nb	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)
0,01	0,16	0,39	0,027	11,35	0,01	0,13	0,173	0,004	48	81

O método utilizado para avaliar a estampabilidade do aço AISI409 foi a técnica dos cinco punções. A técnica combina estampagem profunda com estiramento e a confecção da matriz e dos punções para o processo está descrita a seguir.

2.1 Confecção dos Punções e Matriz

No processo de estampagem, a parte ferramental, matriz e punção, do projeto é de suma importância, pois o mesmo determina o formato da peça final e um erro de cálculo nas suas dimensões ocasionará um prejuízo enorme, já que as peças produzidas deverão ser descartadas e a confecção de uma nova ferramenta tem um custo elevado. Primeiramente, a matriz e os punções foram projetados com o auxílio da ferramenta computacional AutoCAD®, como pode ser observado nas Figuras 1a e 1b.

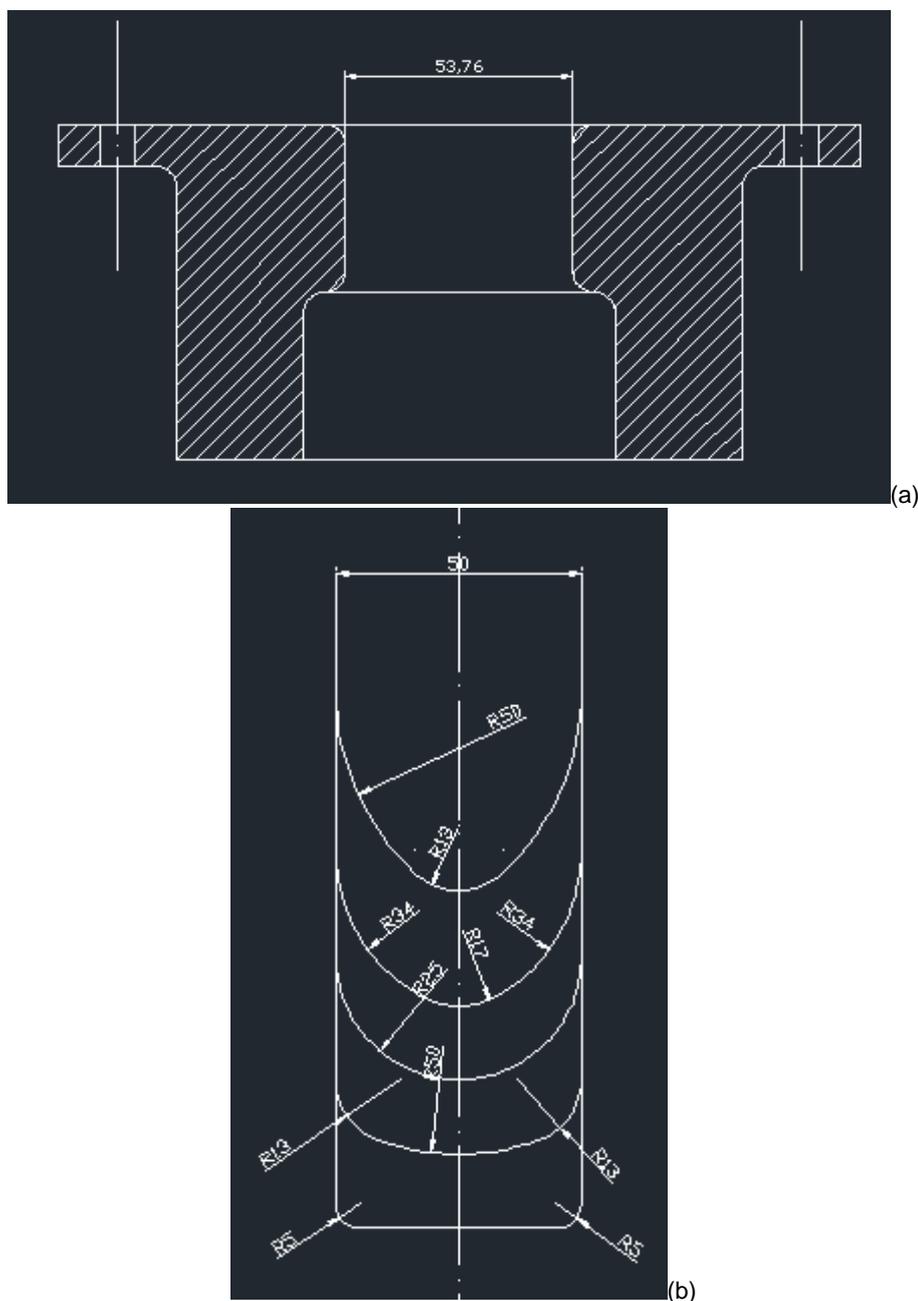


Figura 1. (a) e (b) Dimensões básicas do ferramental.

No projeto do ferramental o parâmetro relacionado à folga entre o punção e a matriz “ w ”, tem uma função crucial durante o processo, pois a folga deve garantir que o material escoe ou ocorrerá o corte da chapa. A folga pode ser calculada através da seguinte equação:⁽²⁾

$$w = e + 0,07\sqrt{10 \times e}$$

Equação 1

Sendo w a folga entre o punção-matriz e e a espessura da chapa.

Os punções (Figura 2) e a matriz (Figura 3) foram confeccionados em aço SAE 1045. Este aço é classificado como de médio teor de carbono, que segundo a literatura possui uma dureza, sem tratamento térmico, mais baixa do que a do aço SAE 409 laminado a frio.

Assim, fez-se necessário a realização de uma têmpera, cuja finalidade foi aumentar a dureza para valores acima dos encontrados para as chapas que serão conformadas. A justificativa desse procedimento dá-se devido às tensões durante o processo de conformação, que poderiam provocar uma deformação na matriz e nos punções, principalmente nas regiões com cantos vivos. A têmpera foi realizada a 900°C, com 10°C/min de rampa de aquecimento. As peças ficaram tempo suficiente na temperatura máxima e o meio de resfriamento utilizado foi óleo.

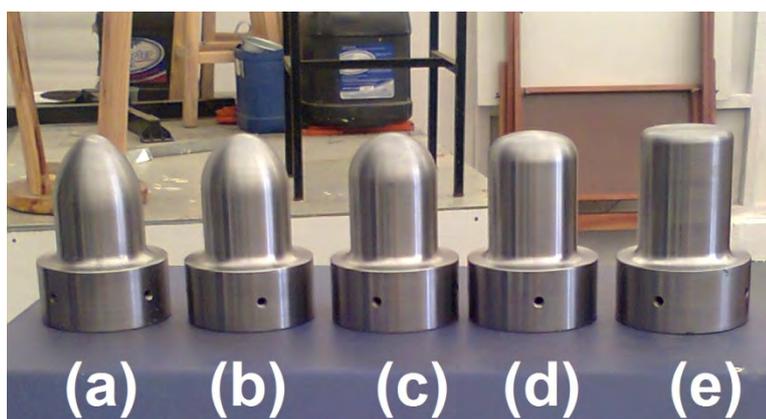


Figura 2. Geometria dos cinco punções: (a) elipse extra-profunda, (b) elipse profunda, (c) hemisfério, (d) elipse rasa e (e) cilíndrico.

Os punções possuem geometrias variadas, possibilitando a análise da combinação de deformações de estiramento e embutimento profundo.⁽⁷⁾ Com relação à Figura 2, observa-se que os punções elipse extra-profunda e elipse profunda possuem uma menor área de contato com a chapa, como consequência o estiramento será maior no centro. As características destes punções tornam mais difícil para o material transmitir as tensões de conformação para o flange.⁽⁷⁾ Quanto maior for o raio de concordância, mais o punção irá adquirir uma forma pontiaguda e o fenômeno de estiramento se torna predominante. Com o aumento da área de contato inicial, há a diminuição do fenômeno de estiramento e um aumento na influência da estampagem profunda.^(7,9) O punção cilíndrico, representado na Figura 2a, produz principalmente estampagem profunda devido sua área de contato inicial ser muito grande.^(7,9)

O ensaio que determina a razão-limite de estampabilidade se inicia com a estampagem do maior diâmetro da geratriz (chapa a ser conformada) este diâmetro é reduzido com incrementos de 5 mm até que a estampagem resulte em uma peça íntegra, sem rugas ou trincas. O diâmetro que obtiver sucesso na estampagem será usado para determinar a razão-limite de estampagem do material. Este

procedimento se repete para cada punção. A partir do calculo da razão-limite de estampagem para o material é possível comparar seu desempenho quando submetido a diferentes tipos de deformação.⁽⁷⁾

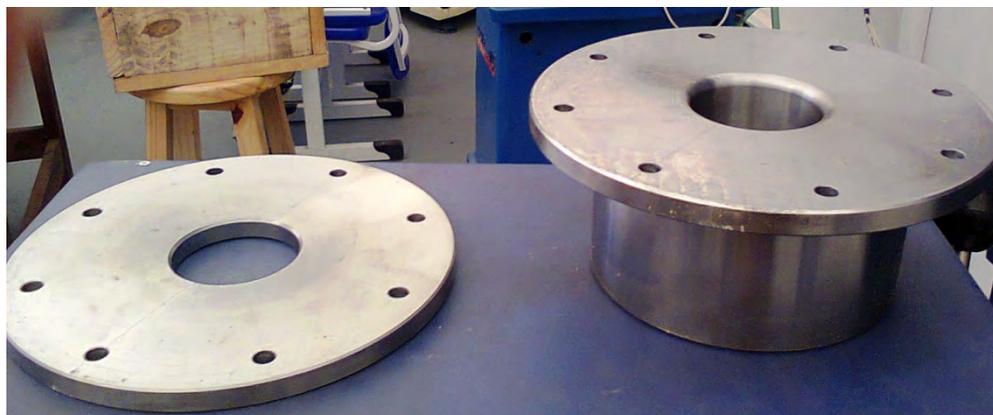


Figura 3. A matriz e o prendedor de chapas confeccionados em aço SAE 1045.

Os ensaios foram realizados em uma prensa motorizada, com capacidade máxima para 50 toneladas. Para que o ensaio fosse realizado com sucesso alguns parâmetros foram definidos, foi utilizada uma graxa específica para lubrificação da chapa e do punção a fim de evitar problemas durante a estampagem. A velocidade do punção foi regulada, o posicionamento da matriz com relação ao punção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de microdureza Vickers mostrados na Figura 4 foram utilizados para determinar a temperatura de recristalização do aço AISI409. De acordo com os resultados, a temperatura de 800°C foi escolhida para o tratamento térmico das chapas utilizadas no ensaio de estampagem. Nesta temperatura o aço encontra-se recristalizado, devido à redução significativa nos valores de microdureza. A recristalização envolve a nucleação e crescimento de novos grãos livres de deformação. O metal recristalizado apresenta uma densidade de discordâncias menor quando comparado com o metal laminado a frio. Vale ressaltar que o aço AISI409 contém Ti em sua composição. O Ti tem a função de formar partículas estáveis que dificultam a recristalização do aço, isto torna o aço indicado para aplicações que envolvam temperaturas mais elevadas. Outra consequência da recristalização é a mudança das componentes da textura cristalográficas. Para os aços laminados a frio as componentes de textura mis comumente reportadas são as pertencentes às fibras α e γ .⁽¹⁰⁾ A componente de textura fibra α tem $\langle 110 \rangle$ paralela à direção de laminação. As componentes da fibra γ são aqueles onde a direção normal é perpendicular à $\{111\}$. Para os aços laminados a frio a fibra α é reportada como sendo a mais intensa e para os materiais recristalizados as componentes da fibra γ . A literatura reporta que grãos com orientações cristalográficas pertencentes à fibra γ acumulam mais discordâncias durante a deformação plástica e, portanto, recristalizam primeiro.⁽¹¹⁾ A maior presença de componentes da fibra γ está relacionada com uma melhor estampabilidade dos aços que apresentam estrutura ferrítica.⁽¹²⁾

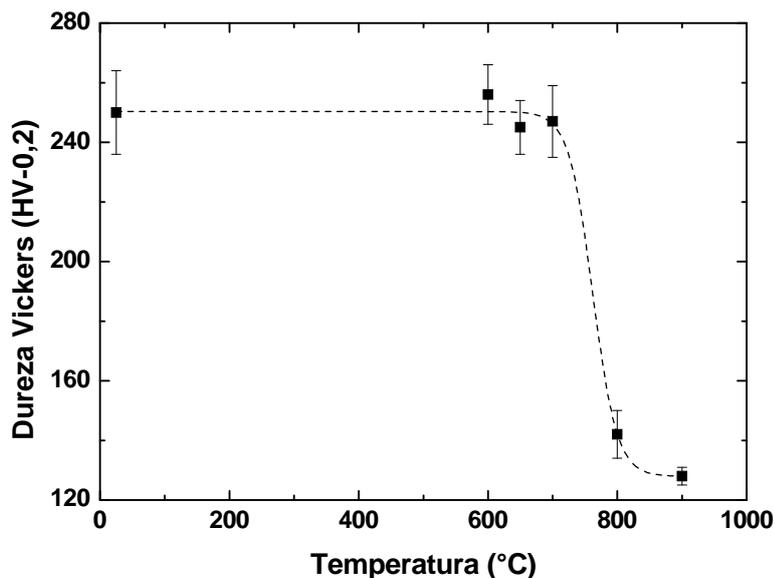


Figura 4. Curva de amolecimento para o aço AISI409 laminado a frio e tratado termicamente por 15 min em diversas temperaturas.

O ensaio de estampagem foi realizado na chapa com diâmetro de 115 mm do aço tratado termicamente em 800C por 15. O primeiro punção utilizado foi o punção cilíndrico que produz, predominantemente, estampagem profunda devido sua área de contato inicial ser muito grande. A estampagem da chapa de aço AISI 409 não ocorreu com sucesso Figura 5a. Uma segunda chapa foi estampada com uma redução no diâmetro de 10 mm. Neste caso a chapa foi reduzida a um diâmetro de 105 mm e mesmo com a redução do diâmetro o processo de estampagem ainda ocorreu sem sucesso Figura 5b.

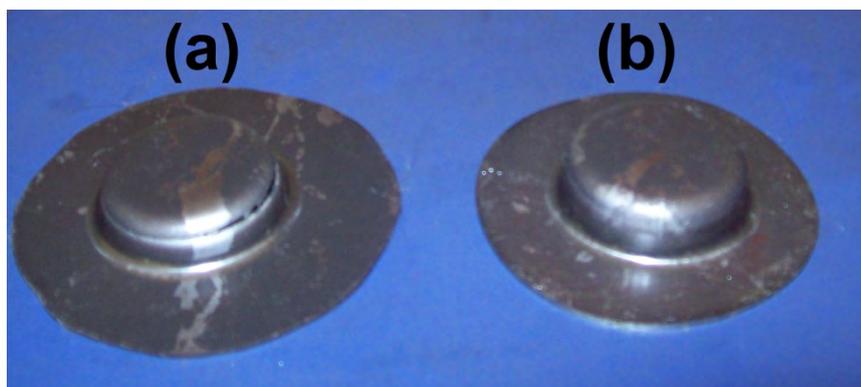


Figura 5. Chapas de 115 mm e 105 mm estampadas com punção cilíndrico.

Comparando o primeiro resultado com a literatura para aços inoxidáveis ferríticos nota-se que o aço inoxidável AISI 409 apresenta menor estampabilidade do que o aço inox 430E. Para o aço AISI430E foi reportado um maior potencial para deformações que envolvam embutimento e uma capacidade limitada de estiramento.⁽⁷⁾ Uma possível explicação para a diferença observada, além dos aços apresentarem composição química diferente, é devido à técnica dos cinco punções ser um ensaio simulativo. Ou seja, é um ensaio sensível à espessura da chapa, lubrificante, condições superficiais da chapa, entre outros.

O punção hemisférico possui uma menor área de contato com a chapa do que o punção cilíndrico, utilizado nos primeiros ensaios. A menor área de contato produz então, um aumento nas deformações de estiramento e redução na estampagem profunda. As deformações de estiramento surgem devido à dificuldade que o material tem de distribuir as tensões para o flange. A variação dos tipos de deformação que ocorrem no material durante o processo de estampagem permite uma melhor análise do material. Assim, foi utilizado o punção hemisférico para continuar a avaliação do aço AISI 409. No primeiro ensaio a chapa possuía um diâmetro de 115 mm, para que houvesse um parâmetro com o resultado da estampagem com o punção hemisférico. A Figura 6a mostra o resultado do primeiro ensaio. Devido ao rompimento do material nesse primeiro ensaio, o que poderia ser previsto de acordo com o resultado dos ensaios com o punção cilíndrico, a chapa foi novamente reduzida na tentativa de que a estampagem fosse realizada com sucesso. O diâmetro do material foi reduzido para 95 mm e novamente estampado com o punção hemisférico. A Figura 6b mostra o resultado da estampagem para esse diâmetro. O sucesso no processo de estampagem da chapa com 95 mm de diâmetro serve como mais uma evidência da menor estampabilidade do aço AISI 409 ao compararmos com o aço AISI 430E, que também é um aço ferrítico inoxidável.

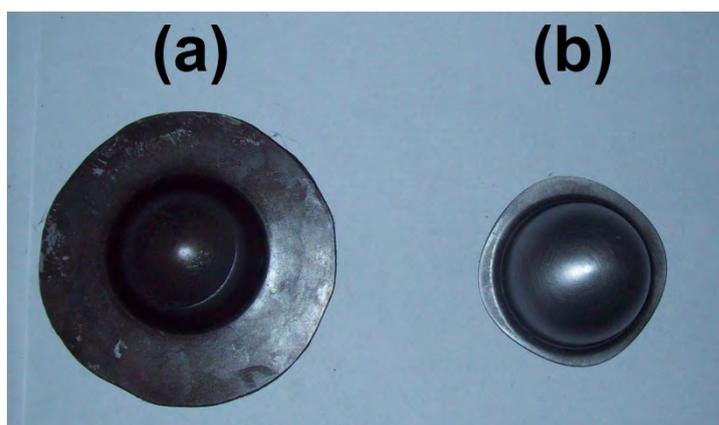


Figura 6. Chapas de 115 mm e 95 mm estampadas com punção hemisférico.

A técnica dos cinco punções permite analisar uma combinação de deformações, o resultado fornecido pelos ensaios é a razão limite de estampagem (β) dada pela Equação 2.

$$\beta = D/d \quad (2)$$

Sendo D, o diâmetro da geratriz e d, o diâmetro do punção.⁽⁷⁾

Calculando a razão limite de estampagem do aço AISI 409 para o punção hemisférico têm-se um valor de 1,9 ($\beta=1,9$). Se compararmos esse resultado com o dado para o aço AISI 430E, vemos que o aço 430E possui um limite de estampagem maior $\beta= 2,3$ para o punção hemisférico. O limite de estampagem para o punção cilíndrico também será menor no aço AISI 409, pois o diâmetro da geratriz necessário para que a estampagem seja realizada com sucesso é menor do que o diâmetro da geratriz se o material utilizado fosse o aço 430E.

4 CONCLUSÕES

Os aços inoxidáveis ferríticos são indicados para aplicações que exijam uma boa resistência a corrosão e apresentam uma boa relação custo/benefício. Essas

qualidades permitem que eles sejam utilizados em diversos setores da indústria. Além da resistência à corrosão, o aço AISI 409 apresenta boa resistência mecânica em temperaturas mais elevadas. O aço AISI 409 laminado a frio com 70% de redução da espessura apresentou um amolecimento significativo após o tratamento térmico em 800°C por 15 min. Comparando o aço analisado com o aço ferrítico inoxidável AISI 430E, pode-se evidenciar uma diferença quanto à estampabilidade. Para o punção hemisférico, a estampabilidade do aço 409 foi de 1,9 enquanto a do aço 430E foi de 2,3. Como consequência deste fato pode-se dizer que o aço estudado neste trabalho apresentou uma menor estampabilidade que o aço AISI430E. Duas possíveis explicações para as diferenças na estampabilidade dos aços ferríticos seriam a composição e a condição inicial do metal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Polikini LTDA. pela confecção da matriz e dos punções, à Fapemig pela concessão de bolsa de iniciação científica, à UNIFEI pelo suporte técnico e à USP-Lorena pela laminação a frio das chapas de aço.

REFERÊNCIAS

- SIQUEIRA, R. P.; RODRIGUES, C. E. M.; SANDIM, H. R. Z.; BALDAN, C. A.; de OLIVEIRA, T. R. Recristalização do aço AISI 430 com estrutura colunar de grãos. **REM: R. Esc. Minas**, v. 60, p. 117-122, 2007.
- MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. **Estampagem dos aços inoxidáveis**. ACESITA S. A., dezembro, 1997.
- CAVAZOS, J. L.; GUERRERO-MATA, P. M.; ZAMBRANO, P. Annealing of a ferritic stainless steel 409 stabilized with titanium and Zirconium additions. **Revista de Metalurgia**, v. 47, p. 38-47, 2011.
- FORONI, F. D.; MENEZES, M. A.; MREIRA FILHO, L. A. Uso do aço AISI 409 para fabricação de pás para ventiladores. **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- SCHAEFFER L. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem. **Ferramental**, p. 31-36, 2006.
- GUIDA, R. B. Conformação dos aços inoxidáveis. ACESITA S. A. Cadernos da assistência técnica, 2004.
- ARRUDA, R. P.; FOLLE, L. F.; SCHAEFFER, L. Simulação avalia ensaio de cinco punções para seleção de materiais. **Corte e Conformação de Metais**, p. 64-71, Janeiro de 2011.
- NETTO, S. E. S. Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação. Dissertação: Porto Alegre, 2004.
- FERRARINI, J. L. Caracterização de materiais para o processo de estampagem. Dissertação: Porto Alegre, 2004.
- LÜCKE, K.; HÖLSCHER, M. Rolling and recrystallization textures of bcc steel. **Textures and Microstructures**, v. 14-18, p. 585-596, 1991.
- HUTCHINSON, B. Deformation microstructures and textures in steels **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A**, v. 357, p. 1471-1485, 1999.
- FERREIRA Filho, A.; HERRERA, C.; de LIMA, N. B.; PLAUT, P. 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: Revista Escola de Minas**, v. 61, p. 151-158, 2008.