

ANÁLISE DA CONFORMABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E AISI 201¹

Baú, A. R.²
Boff, U.³
Ravanini, O⁴
Schaeffe, L.⁵

Resumo

O presente estudo busca analisar a conformabilidade do aço inoxidável AISI 201 e compará-la com a do aço inoxidável AISI 304. Para análise da conformabilidade, as duas classes de aço foram examinadas utilizando ensaios de embutimento Erichsen, ensaios de tração e anisotropia, ensaio de dureza e análise da composição química. Além dos ensaios, utilizou-se da simulação por elementos finitos através do software Form-Advisor para análise dos materiais quando submetidos ao processo de estampagem. A validação do estudo se deu através da estampagem de ambos os materiais. O objetivo em analisar a conformabilidade de ambos os materiais é a viabilização da substituição do material empregado na fabricação da peça Disco Distribuidor Adubo que hoje é produzida em aço inox AISI 304 pelo aço inox AISI 201. A substituição se deve ao custo do material, sendo que o aço AISI 201 reduz os custos de fabricação das peças. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que o comportamento de ambos os materiais foram semelhantes, o que pode ser comprovado durante a simulação e a estampagem das peças, sendo que ambos os materiais permitem ser estampados sem que haja problemas com trincas ao longo do processo de estampagem das peças.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis AISI 201 e AISI 304, conformabilidade, simulação por elementos finitos.

¹ 16ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas/3ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Engenheiro de Processos da Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas.

³ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Diretor da AUTOLENS Engenharia.

⁵ Prof. Dr.-Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos componentes fabricados em aço inoxidável são produzidas a partir do AISI 304. Para Toit *et al.*, (2012), esse aço contém aproximadamente 18% de cromo e 8% de níquel. O preço do níquel tende a ser variável e ocasiona picos a níveis muito elevados de custo. Um incentivo, portanto, existe para produzir um aço inoxidável com propriedades semelhantes às daquelas do AISI 304, mas com elementos menos dispendiosos, substituindo a totalidade ou parte do níquel.

A função primária do níquel em aços inoxidáveis austeníticos é assegurar que o aço permaneça austenítico para uma dada temperatura. O níquel aumenta o campo de fase austenita a temperaturas elevadas. Estabiliza a austenita contra a formação de martensita, baixando a temperatura

O nitrogênio é muito eficaz em substituir o níquel nos aços inoxidáveis, porque atua na formação e estabilização da austenita. Infelizmente, todo o níquel não pode ser substituído por nitrogênio devido à solubilidade limitada. O manganês é conhecido por aumentar a solubilidade do nitrogênio. Isso constitui a principal razão para a adição significativa de manganês como um elemento de liga para aços inoxidáveis.

Toit *et al.*, (2012), mostra que os aços inoxidáveis da série 200 foram desenvolvidos para resolver a escassez do níquel. Sendo este substituído por manganês. Os principais aços dessa série são o AISI 201 e o AISI 202. Por possuir um menor teor de níquel, essas ligas apresentam uma maior dureza e resistência quando comparado a série 300. Porém esse aumento de resistência e dureza não compromete a ductilidade. Sendo recomendado a utilização do AISI 201 onde se necessita boa usinabilidade e o AISI 202 onde se necessita boa conformabilidade.

Uma possível desvantagem de aços da série 200 como substitutos para os da série 300 é uma rápida taxa de endurecimento por deformação. Esta rápida taxa de encruamento é atribuída à transformação metaestável da austenita para martensita induzida por deformação, devido a luxação de iterações.

Segundo Campos *et al.*, (2006), os processos tecnológicos de conformação de metal por meio de deformação plástica, permitem a produção de peças mecânicas com elevada taxa de produção. O sucesso de uma operação de conformação plástica depende em vários parâmetros interativos de natureza diferente, geometria, as condições de operação, as propriedades do material.

Para o desenvolvimento do processo de estampagem, é necessário o conhecimento do material. Gao *et al.*, (2013), fala que ensaios mecânicos, são utilizados na simulação e projetos de punções e matrizes. Elementos como a maleabilidade do material pode ser determinados. Facilitando o desenvolvimento do processo de estampagem para obtenção de um componente.

Alguns tratamentos térmicos, podem ser utilizados para melhorar a conformabilidade dos aços. Conforme Gao *et al.*, (2013), para aço inoxidável AISI 304, quando recozido, observa-se que o tamanho de grão possui uma influência menor se comparado com o efeito da deformação alcançada por esse aço no estado recozido. Possibilitando dessa forma, obter-se deformações maiores sem que haja a ruptura do aço.

A análise da conformabilidade dos aços Inox AISI 201 e AISI 304, será feita por meios de ensaios, simulação computacional e estampagem da peça, conforme mostrado na figura 1. A peça cujo nome comercial é Disco Distribuidor Adubo, é atualmente produzida pela STARA em aço inox AISI 304 e aplicado em equipamentos agrícolas. O objetivo do estudo é analisar a conformabilidade de ambos os aços e a viabilização da substituição do aço inox AISI 304 pelo aço inox AISI 201.



Figura 1. Disco distribuidor adubo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços inoxidáveis utilizados no presente trabalho, foram o aço inoxidável AISI 304 e AISI 201, ambos com espessura de 2,5mm no estado recozido. Para análise da conformabilidade, foram realizados os seguinte ensaios: análise da composição química, dureza, ensaio de tração e anisotropia e ensaio de embutimento erichsen. A análise da conformabilidade foi avaliada através da estampagem das peças e com o auxílio da simulação computacional através do software Form-Advisor da C3P Software. Alguns destes ensaios serviram como dados de entrada para a simulação computacional.

2.1 Composição Química

Este ensaio é realizado através de um aparelho cuja essência de funcionamento está na espectrometria óptica. O material é acoplado no equipamento e, em um tempo que varia de 15 a 30 segundos (dependendo do material), toda a composição é listada em um relatório gerado pelo próprio software.

2.2 Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza, utilizou-se do método Brinell, realizado conforme norma ASTM E10, e consiste em um penetrador de formato esférico com 10 mm de diâmetro, feito de aço de elevada dureza ou de carbeto de tungstênio. A carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf, durante o teste a carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos. O número Brinell de dureza (HB) é função da carga aplicada e do diâmetro da impressão.

2.3 Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração, utilizou-se a norma DIN10002 para confecção dos corpos de prova, sendo recortados pelo processo de corte a laser. O ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaios EMIC DL60000 a uma velocidade de 5mm/min conforme a norma ABNT NBR 6892:2002.

Segundo Ferrarini, (2004), o corpo de prova é fixado por uma extremidade em uma máquina de ensaio mecânico que possui uma garra que fixa a outra extremidade do corpo de prova, aplica-se um carregamento que traciona uniaxialmente o corpo de prova com

velocidade controlada e constante, deformações ocorrerão até que o material do corpo de prova seja rompido, sendo l_0 e l_1 as dimensões inicial e final do corpo de prova.

A máquina possui também sensores que fazem a leitura das deformações causadas pela ação do carregamento externo. Essas informações são plotadas através de em um gráfico denominado curva tensão $[\sigma]$ x deformação relativa $[\varepsilon]$.

O fato de geralmente as curvas de escoamento obtidas através do ensaio de tração, apresentarem um baixo grau de deformação, muitas vezes é necessário que se faça uma extrapolação matemática, onde para um processo de deformação a frio, utiliza-se a equação exponencial de Hollomon, tendo a seguinte forma:

$$kf = C \cdot \varphi^n$$

Onde kf representa a tensão de escoamento, C é uma constante do material e n é o índice de encruamento.

2.4 Anisotropia

A anisotropia caracteriza as propriedades de uma chapa metálica levando-se em conta os efeitos de sua heterogeneidade causada no processo de laminação. Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação provocando uma heterogeneidade nas propriedades das chapas, apresentando valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção em que o material foi laminado, uma vez que a laminação modifica a orientação cristalina dos grãos que compõem o material. Através da norma ASTM E 517, foi determinada a anisotropia normal do aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 com três ensaios válidos para 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa. O valor médio de anisotropia r_m estima a anisotropia de um material e pode ser determinado a partir da seguinte equação:

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}$$

A anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. O coeficiente de anisotropia planar Δ_r é dado pela equação:

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2}$$

2.5 Ensaio Erichsen

Os ensaios de embutimento são realizados por meio de dispositivos acoplados a um equipamento que transmite força. Os ensaios podem ser realizados em uma máquina universal de ensaios, adaptada com os dispositivos próprios, ou em uma máquina específica.

A chapa a ser ensaiada é presa entre uma matriz e um anel de fixação, que tem por finalidade impedir que o material deslize para dentro da matriz. Depois que a chapa é fixada, um punção aplica uma carga que força a chapa a se abaular até que a ruptura aconteça.

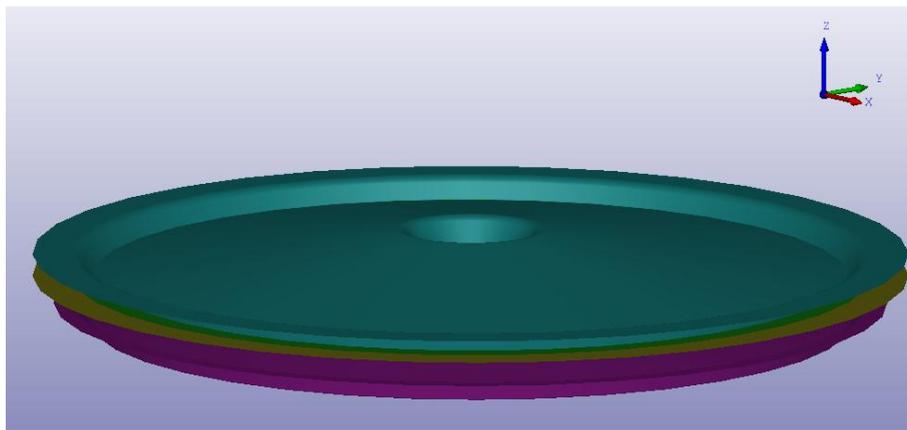


Figura 3. Montagem do setup no Form-Advisor.

2.7 Estampagem das Peças

A estampagem das peças ocorreu na STARA, onde foi utilizado uma prensa da marca dan-Pressé, modelo DRA800x250. A velocidade do processo é de 25mm/s. O blank possui um diâmetro de 320mm. As ferramentas são compostas por um punção e matriz, sem a presença do prensa-chapas. Para lubrificação do blank com as ferramentas, foi utilizado o lubrificante Rocol Ultraform 2806 M100. Na figura 4 pode ser vista uma imagem do equipamento utilizado para estampagem das peças.



Figura 4. Equipamento utilizado para estampagem das peças.

3 RESULTADOS

3.1 Composição Química dos Aço AISI 201 e AISI 304

O ensaio de composição química foi realizado nas dependências da STARA – Indústria de Implementos Agrícolas, sendo utilizado para sua realização um espectrômetro Brucker Q4 TASMÁN, microscópio e acessórios de preparo de amostragem, sendo que a composição química encontrada pode ser vista na tabela 1.

AISI	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Ti%	Co%	Cu%
------	----	-----	-----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

304	0,027	1,254	0,390	0,033	0,005	18,791	5,928	0,108	0,004	0,136	0,129
201	0,079	10,070	0,462	0,037	0,001	14,032	1,029	0,068	0,006	0,123	0,412

Tabela 1 – Resultados do ensaio de composição química.

3.2 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza também foi realizado nas dependências da STARA, sendo utilizado um durômetro do modelo Microtest 737, a dureza Brinell encontrada nas amostras pode ser observada na tabela 2, e também é obtido pela seguinte equação:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

onde $P[kgf]$ é o valor da carga aplicada, $D[mm]$ é o diâmetro do penetrador e $d[mm]$ é o diâmetro da impressão resultante, ambos em milímetros.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de dureza.

AISI	HB
304	170
201	220

3.3 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. A figura 5 mostra a curva tensão x deformação relativa para ambos os materiais, já na tabela 3, estão expressas os resultados do ensaio de tração.

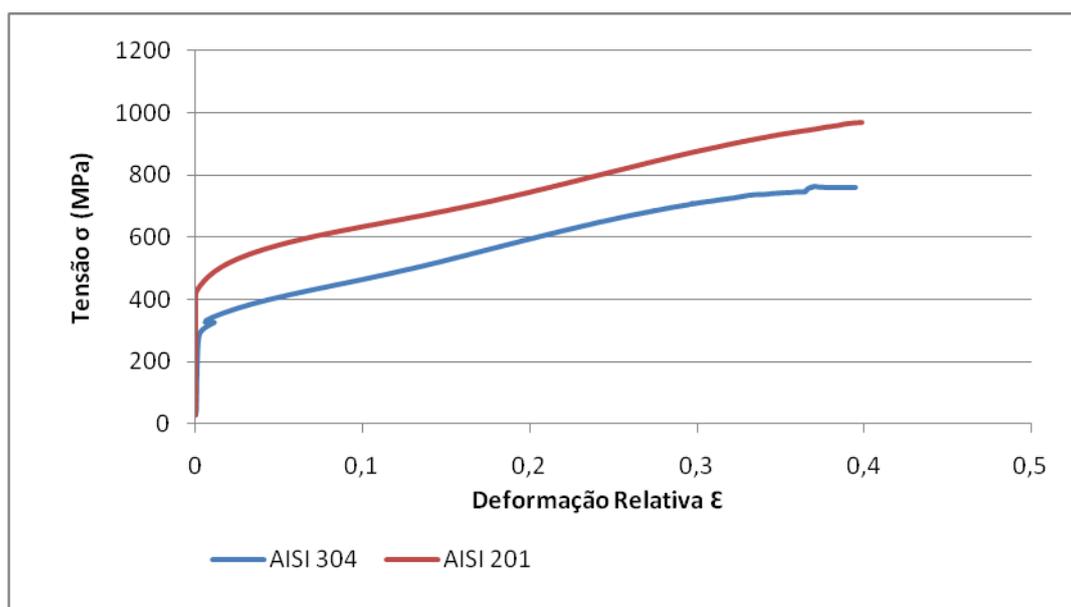


Figura 5. Curva tensão x deformação relativa aço Inox AISI 201 e AISI 304.
Tabela 3 – Resultados ensaio de tração

<i>AISI</i>	σ_m [MPa]	σ_e [MPa]	<i>Alongamento</i> [%]	<i>C</i>	<i>n</i>
304	787	308	59	1510	0,42
201	1016	455	52	1750	0,36

3.4 Anisotropia

Os ensaios de anisotropia também foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM). Para as medições, foi utilizado o método de medição por largura, sendo os corpos de prova tracionados até o limite de 15%. A tabela 4 ilustra os resultados obtidos no ensaio de anisotropia para ambos os aços.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de anisotropia.

<i>AISI</i>	<i>r 0°</i>	<i>r 45°</i>	<i>r 90°</i>	<i>r_m</i>	Δ_r
304	1,2122	1,1293	1,0592	1,1325	0,0063
201	1,1590	1,1201	0,9755	1,0937	-0,0529

3.5 Ensaio Erichsen

O ensaio erichsen foi realizado conforme ABNT NBR5902, a carga de fixação do corpo de prova entre a matriz e o anel de fixação deve ser de 1000kgf. A velocidade de deformação do corpo de prova deve ser realizada sem choques e vibrações, com velocidade de penetração entre 5 mm/min e 20 mm/min.

Para o ensaio erichsen, foi utilizada uma máquina universal de ensaios a uma velocidade de 5mm/min, conforme ilustrado na figura 6.



Figura 6. Ensaio Erichsen.

Os resultados de ensaio erichsen podem ser vistos na tabela 5, onde está representada a média dos ensaios realizados, sendo um total de 3 ensaios válidos.

Tabela 5 – Índice Ericshen.

<i>AISI</i>	<i>IE</i>
304	19,26
201	18,16

3.6 Simulação Computacional

As simulações foram realizadas utilizando como dados de entrada os dados obtidos nos ensaios de tração e anisotropia (tabela 3 e 4). A curva tensão x deformação verdadeira é gerada pelo software a partir do método de Hollomon. O coeficiente de atrito utilizado entre as ferramentas e o blank foi de 0,1. A velocidade do processo foi de 25mm/s. Para o blank foram utilizadas malhas do tipo quadrangular com 2,75mm, já para as ferramentas foram utilizadas malhas do tipo triangular com tamanho máximo de 5mm e mínimo de 1mm. A figura 7 mostra os resultados da simulação computacional para o aço AISI 201 tendo como critério de falha a curva CLC e a espessura. Nota-se que mesmo com uma redução de espesura considerável na região central da peça, a CLC indica que não haverá riscos de ruptura na peça.

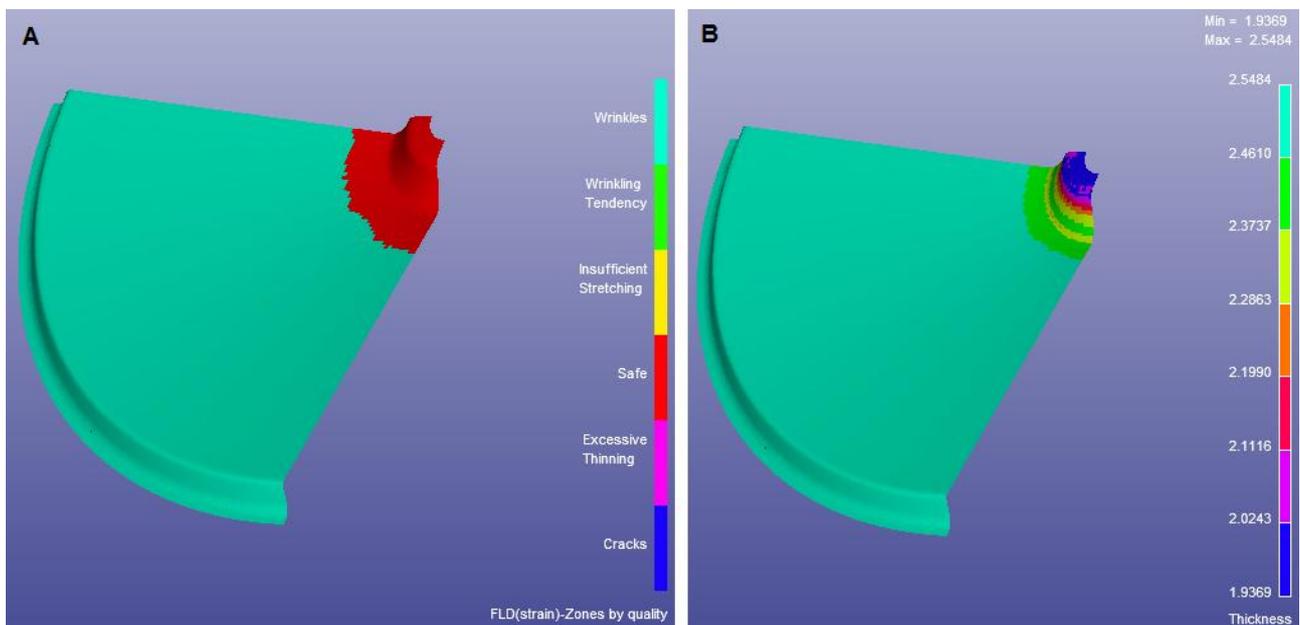


Figura 7. Resultados da simulação computacional para o aço AISI 201. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

Na figura 8 estão expressos os resultados da simulação computacional para o aço AISI 304. Assim como ocorrido no aço AISI 201, não houve indícios do surgimento de trincas na peça, apenas o aumento de espessura na borda da peça ocasionada pelo enrugamento. Porém os resultados indicam que ambos os materiais poderiam ser empregados na fabricação desta peça.

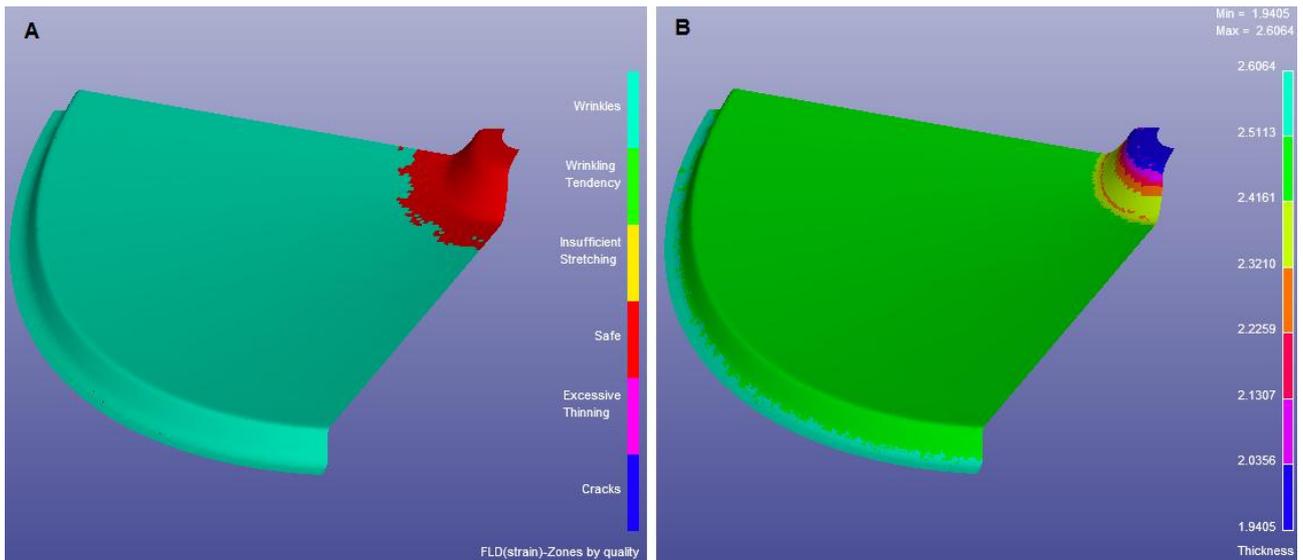


Figura 8. Resultados da simulação computacional para o aço AISI 304. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

3.7 Estampagem das Peças

De forma a validar os resultados obtidos na simulação numérica, foram estampadas 3 peças em aço inox AISI 201 e AISI 304. Na figura 9 pode ser vista a peça estampada em aço AISI 201. Nota-se que assim como a simulação já havia indicado, a peça estampou de forma correta sem que houvesse algum indicio de trinca, o mesmo ocorreu para o aço AISI 304, mostrado na figura 10.



Figura 9. Peça estampada em aço inox AISI 201.



Figura 10. Peça estampada em aço inox AISI 304.

Assim como ocorreu na simulação computacional, o aço inox AISI 201 apresentou aspectos muito semelhantes ao aço inox AISI 304, isso mostra que o material pode substituir o aço inox AISI 304 sem grandes problemas, reduzindo desta forma os custos de fabricação da peça.

4 CONCLUSÃO

O estudo de conformabilidade do ao inox AISI 304 e AISI 201, sugere que os dois aços possuem características semelhante quando se fala em processo de estampagem.

No ensaio de composição química, tabela 1, observa-se a principal diferença entre o aço inoxidável AISI 304 e AISI 201 está no teor de carbono, manganês e níquel, apresentando no AISI 201 um teor de carbono e manganês em níveis superiores e o teor de níquel em nível inferior.

Referente ao ensaio de dureza, tabela 2, nota-se que o número Brinell, para o inox AISI 304 é 170HB e para o AISI 201 é 220HB. De modo que o aço inox AISI 201 possui uma dureza cerca de 29% maior.

Para o ensaio de tração, tabela 3, pode ser visto que o inox AISI 201 possui uma tensão de ruptura σ_m e um limite de escoamento σ_e superior ao inox AISI 304, chegando a um aumento de 29% e 47% respectivamente, já seu alongamento, diminui 12% em relação ao AISI 304.

O índice de anisotropia média r_m , tabela 4, mostra que o inox AISI 304 possui um índice de 1,13 e o AISI 201 possui 1,09, ou seja, valores praticamente iguais, o que comprova que ambos os aços apresentam uma excelente conformabilidade.

No ensaio Ericshen, tabela 5, observa-se que o índice Ericshen para o inox AISI 304 é de 19,26 e para o AISI 201 é de 18,16, resultando em aços de excelente conformabilidade, principalmente em condições de embutimento profundo.

Embora existem pequenas diferenças entre os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 201, pode-se afirmar que os dois aços possuem características muito semelhantes e podem ser utilizados para o mesmo processo de estampagem, observando-se as restrições de cada operação.

Quanto a simulação numérica, os resultados mostram que ambos os materiais apresentaram comportamentos muito semelhantes, o mesmo pode ser comprovado durante a estampagem das peças, onde para estas características, o aço inox AISI 201

pode substituir o aço inox AISI 304, reduzindo desta forma os custos de fabricação da peça.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pela utilização dos equipamentos, a empresa C3P Engineering Software International Co., LTD pela utilização do Software, a STARA pela matéria prima e realização de ensaios e as instituições de fomento à pesquisa CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, H. B., BUTUC, M. C., GRACIO, J. J., ROCHA, J. e, DUARTE, J.M F.: Theoretical and Experimental Determination of the Forming Limit Diagram for the AISI 304 Stainless Steel, **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.179, p56-60, 2006.

FERRARINI, J. L. : Caracterização dos Materiais para o Processo de Estampagem. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GAU, J.T., CHEN P.H., GU H. e LEE R. S. : The coupling influence of size effects and strain rates on the formability of austenitic stainless steel 304 foil, **Journal of Materials Processing Technology**, v.213, p376-382, 2013.

KIM, Hyung-Wook, LIM, Cha-Yong Annealing of flexible-rolled Al–5.5 wt%Mg alloy sheets for auto body application, **Materials and Design**, v31, p71-75, 2010.

PEREIRA, P. H. R., FIGUEIREDO, R. B., AGUILAR, M. T. P., CETLIN, P. R. *Avaliação da estampabilidade de chapas bimetálicas através do método dos elementos finitos.* . In: Anais da 2ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, 2012.

TOIT, M. du and STEYN, H.G.: Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steels, **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.21, p1491-1495, 2012.

Formability analysis stainless steel AISI 304 and AISI 201

Abstract

This study search to analyze the formability of stainless steel AISI 201 and compare it with stainless steel AISI 304. For analysis of formability, the two classes of steel were examined using Erichsen cupping tests, tensile testes and anisotropy, hardness testing and chemical composition analysis. In addition to the tests employed the finite element simulation software through the form-Advisor for the analysis of materials when subjected to the stamping process. The validation study was through the printing of both materials. The purpose of analyzing the formability of both materials is the feasibility of replacing the material used in the manufacture of the part which is now produced in stainless steel AISI 304 by 201. The replacement is due to the material cost, and the AISI 201 reduces the costs of manufacturing the parts. The results of the tests showed that the behavior of the two materials were very similar, which can be verified in the simulation and stamping of parts, and allow both materials being printed without any problems with cracks during the process of stamping parts.

Keywords: Stainless steel AISI 201 and AISI 304, formability, finite element simulation.