

# ESTUDO COMPUTACIONAL DA ESTAMPABILIDADE DE AÇO INOXIDÁVEL ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE CINCO PUNÇÕES\*

Marcelo Sousa de Carvalho<sup>1</sup>

Fábio André Lora<sup>2</sup>

Rodrigo Santiago Coelho<sup>3</sup>

## Resumo

Os aços inoxidáveis possuem uma alta aplicabilidade nas indústrias de petróleo e gás, química e de papel e celulose, principalmente, devido à suas características de alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica. Neste trabalho, estudos baseadas na técnica dos cinco punções foram realizados para avaliar as características de conformação do aço inoxidável UNS S32304. A metodologia baseia-se na caracterização mecânica do material para mensurar suas propriedades, como limite de escoamento e índice de anisotropia. Seguiu-se com uma análise teórica da estampabilidade do material através da simulação computacional do ensaio de cinco punções. Esta técnica analisa tipos de deformações desde o estiramento biaxial até o embutimento profundo. Esse trabalho apresenta uma análise computacional do comportamento desse material com relação à estampagem para os diversos punções. É apresentado o gráfico da Razão Limite de Estampagem teórica para o UNS S32304 em relação aos cinco punções utilizados e a influência do coeficiente de anisotropia normal nos resultados.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável; Ensaio de cinco punções; Conformação de chapas; Razão de estampagem.

## COMPUTATIONAL STUDY OF FORMABILITY OF STAINLESS STEEL THROUGH THE NUMERICAL SIMULATION OF FIVE PUNCH TEST

### Abstract

The stainless steel shows a high applicability in industries of oil and gas, chemical and cellulose and paper, mainly due to its high corrosion resistance and high strength characteristics. In this work, studies based on the five punch test were performed to evaluate the formability of the stainless steel UNS S32304. The method is based on the mechanical characterization of the material such as yield strength and anisotropy level. After measuring those properties, it was made a theoretical analysis of the formability of the material through a computer simulation based on the five punch test. This technique analyzes the types of resulting deformation from biaxial stretching to deep drawing. This paper presents a computational analysis of the material behavior in relation to the stamping for various punches. It is presented the analyses of the theoretical Limiting Drawing Ratio for UNS S32304 steel obtained by the five punches test and, in addition, discussed in terms of the influence of the normal anisotropy coefficient in the results.

**Keywords:** Stainless steel; Five punch test; Sheet metal forming; Limit drawing ratio.

<sup>1</sup> Engenheiro mecânico, graduado, pesquisador, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro mecânico, doutor, coordenador, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro mecânico, doutor, diretor, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o mercado cada vez mais acirrado, grande parte devido à globalização e a um consumidor mais exigente na busca por qualidade e preço, as indústrias procuram alternativas para reduzir os seus custos de produção sem afetar diretamente a qualidade do produto [1]. Assim sendo, no mercado de peças estampadas não poderia ser diferente. Fabricantes procuram investir em mecanismos que proporcionem redução no custo final do produto, sem que afete a qualidade deste como a busca por novos materiais que sejam menos dispendiosos e a aplicação de simulação numérica para reduzir etapas do processo de produção.

### 1.1 Aço Inoxidável

O aço inoxidável tem uma ampla aplicação na indústria, se estendendo desde o setor de óleo e gás até alimentos e medicamentos. Os equipamentos fabricados neste material são mais adequados devido ao fato do aço inox possuir elevada resistência à corrosão e, em alguns setores, ao fato de sua superfície ser muito lisa, o que previne o acúmulo de impurezas facilitando a higienização.

Com grande portfólio, o aço inox é oferecido no mercado em aplicações de fabricação mais simples, como utensílios domésticos, até às mais complexas como válvula e trocadores de calor. Estas aplicações, em sua maioria, necessitam de um bom desempenho no processo de estampagem e fabricação de peças.

Os aços inoxidáveis podem variar de acordo com sua microestrutura e sua utilização vai depender dos efeitos proporcionados por esta, como os aços inoxidáveis austeníticos que combinam alta resistência com boa capacidade de conformação. O duplex, por exemplo, tem como principal motivo de sua utilização à capacidade de unir as características de dois aços inoxidáveis, os austeníticos e os ferríticos, de forma equilibrada. Já o aço *lean* duplex destacou-se no mercado por conta do seu menor custo em relação ao duplex convencional, devido à redução nos teores de níquel e molibdênio [2]

Neste contexto, o aço inoxidável *lean* duplex UNS S32304 torna-se interessante pela possibilidade de substituir aços austeníticos como o AISI 304L e 316L sem comprometer as características finais do produto [2,3]. Na Tabela 1 estão expostas as propriedades do UNS S32304 em comparação com outros aços.

**Tabela 1.** Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis [2]

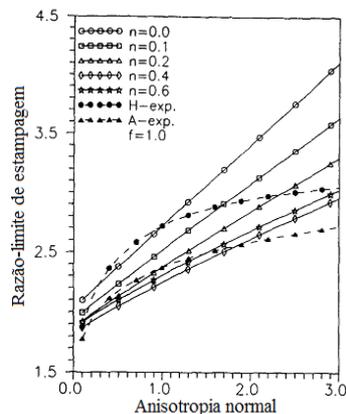
AISI/UNS	Resistência ao escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento Mínimo (%)	Dureza Vickers	Microestrutura
304L	210	515-680	45	155	Austenita
316L	220	515-690	40	160	Austenita
S 32304	400	600-820	25	230	Duplex
S 31803	450	680-880	25	260	Duplex
S 32750	550	800-1000	25	290	Duplex

### 1.2 Anisotropia

Diversos estudos foram publicados para analisar a influência do coeficiente de anisotropia normal na razão-limite de estampagem [4]. Neles foram produzidos gráficos que explicitam a forte influência do coeficiente de anisotropia normal, de forma que quanto maior o coeficiente, maior será a razão-limite de estampagem.

Observa-se na Figura 1 que essa relação varia de acordo com o índice de encruamento ( $n$ ) do material.

O aumento no coeficiente de anisotropia normal proporciona uma redução na tensão de escoamento no flange enquanto na parede do copo mantêm-se as mesmas [5]. Assim sendo, quando o coeficiente de anisotropia normal é menor que um, o material possui uma menor capacidade de ser estampado, já que a deformação na espessura é maior que as demais, consequentemente rompendo prematuramente.



**Figura 1.** Relação entre o coeficiente de anisotropia normal, a razão-limite de estampagem e o índice de encruamento [4].

### 1.3 Estampabilidade dos Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis apresentam grande crescimento no mercado mundial devido principalmente às suas características de resistência a corrosão, ao passo que as indústrias destes aços projetam um aumento na sua produção. Para tal, novos e melhores tipos de aços vêm sendo desenvolvidos e testados, principalmente no que tange sua estampabilidade. Outro fator de peso é o custo destes aços, de forma que variações nos elementos de liga visando à redução nos custos de matéria-prima estão sendo empregados. Sendo assim, faz-se necessária uma análise dos efeitos destas variações de composição na estampabilidade do material.

Diversas são as formas de se analisar a estampabilidade de um material, uma forma muito usual é através da Curva de Limite de Conformação (CLC) que determina a capacidade máxima de deformação tolerada por um material quando sujeito ao processo de estampagem [6,7]. Este parâmetro ainda apresenta grande importância no projeto de peças estampadas através simulação computacional, pois a CLC é utilizada como critério de falha nos programas de simulações numéricas do processo de estampagem [7,8]. Outro parâmetro bastante utilizado é a razão limite de estampagem (RLE), este parâmetro determina o limite da passagem de uma geratriz com diâmetro ( $D$ ) para um corpo estampado com diâmetro ( $d$ ), diâmetro do punção [9].

Na Tabela 2 está apresentada a razão limite de estampagem do aço 304 e de um aço experimental onde parte do níquel foi substituído por manganês, nitrogênio e cobre, com o intuito de se reduzir o custo do aço. E na Tabela 3 a razão limite de estampagem de alguns aços inoxidáveis.

**Tabela 2.** Comparação entre a estampabilidade de dois aços inoxidáveis [10]

Aço	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)	RLE (-)
304	276±1	770±8	2,04
Aço experimental	393±5	751±4	2,12

**Tabela 3.** Comparação entre a razão limite de estampagem dos aços 298, 430E, 304 e 304N [11]

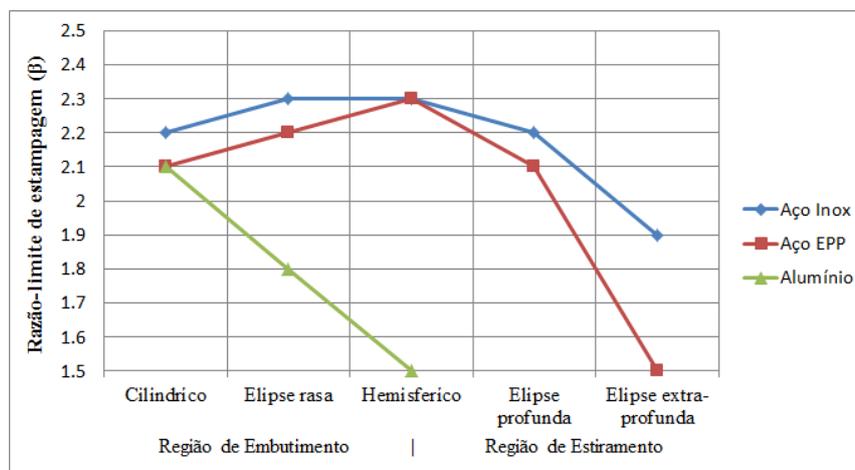
Aço	RLE (-)
298	2,1
430	2,3
304	2,1
304N	2,1

### 1.4 Ensaio de Cinco Punções

O ensaio de cinco punções é uma adaptação do ensaio Swift, onde se varia o formato do punção utilizado no ensaio, iniciando-se pelo cilíndrico (Swift) e seguindo-se pelos de elipse rasa, hemisférico, elipse profunda até chegar ao de elipse extra-profunda [11]. Através do ensaio de cinco punções, primeiramente proposto por Hennig [12], é possível analisar os efeitos de diferentes tipos de deformações no material.

Esta técnica baseia-se na obtenção da Razão-limite de Estampagem ( $\beta_{\text{máx}}$ ) para diferentes tipos de punção. Assim sendo, é possível fazer o levantamento de uma curva que auxiliará na seleção de materiais para projeto, já que através desta é possível analisar qual tipo de sollicitação o material selecionado é mais adequado para se utilizar e qual estará mais propício a falhar [11,12].

Na Figura 2 estão representados nos gráficos os valores da para razão limite de estampagem para do aço inox, aço EPP e do alumínio, de forma que o aço inox apresenta melhor desempenho com uma leve queda na região estiramento.



**Figura 2.** Razão limite de estampagem para alguns materiais [12].

### 1.5 Método de Elementos Finitos

Com o intuito de evitar procedimentos experimentais dispendiosos e que demandam tempo, o método de simulação numérica passou a ser utilizado extensivamente. Sua constante evolução na indústria de conformação de chapas proporcionou uma maior avaliação das deformações e defeitos ocasionados durante este processo [13].

A simulação numérica é aplicada para analisar peças em um estágio inicial de desenvolvimento assim como para otimizar os parâmetros do processo para se obter uma produção segura.

Na Figura 3 pode-se observar o resultado das simulações realizadas por Lora (2009) para estampagem de um copo utilizando como critério de falha a Curva Limite de Conformação.

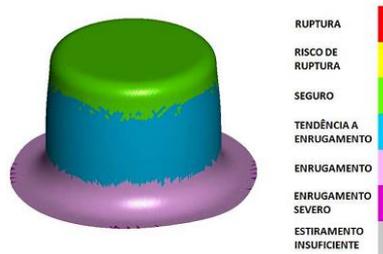


Figura 3. Copo de aço BH 180 produzido no processo de simulação numérica [14].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi feita uma caracterização mecânica do aço *lean* duplex UNS S32304 através dos ensaios de tração e anisotropia. Foram cortados 18 corpos de prova padrão do material UNS S32304, dos quais nove foram utilizados para os ensaios para averiguar a anisotropia do material, sendo dispostos em três posições distintas em relação à direção de laminação da chapa (0°, 45° e 90°), sendo três para cada posição. Os demais corpos foram usados no ensaio de tração.

Através destes ensaios foi possível obter o índice de encruamento necessário para obtenção da CLC teórica, utilizada no software de simulação como critério de falha. Outras propriedades obtidas nestes ensaios foram necessárias para simular o ensaio de cinco punções para este material.

### 2.1 Ensaio de Tração e de Anisotropia

Para a execução do ensaio de tração os corpos de provas foram dimensionados conforme a norma ASTM E 8M. Os ensaios foram executados na máquina de tração de marca EMIC com capacidade de 30 toneladas. O ensaio de tração baseia-se na fixação do corpo de prova entre suas garras de forma que este fique preso para assim ser tracionado axialmente à velocidade constante até sua consequente ruptura. São fornecidos pela máquina ao final do ensaio a força (em Newton) aplicada pela célula de carga e o aumento do comprimento (em milímetros) medido pelo extensômetro.

O ensaio de anisotropia é semelhante ao de tração, desta forma utiliza-se a mesma máquina para o ensaio e corpos de prova com as mesmas dimensões. Contudo o ensaio de anisotropia é interrompido antes da ruptura do corpo de prova. Segundo norma ASTM E517-00 este ensaio deve ser executado até o aumento do comprimento atingir entre 15 a 20% do comprimento útil inicial do corpo de prova.

No ensaio de anisotropia aplicou-se 17% de alongamento no corpo de prova, seguindo o critério da norma. Após o ensaio são retiradas as medidas do comprimento final e largura final do corpo de prova para se obter os coeficientes de anisotropia para cada ângulo em relação à laminação da chapa.

### 2.2 Curva Limite de Conformação

Tepedino [7] discorre sobre a dificuldade de se obter a CLC por modelos numéricos. A CLC pode ser obtida de forma teórica por diversos métodos como Swift-Hill, Swift-Hill modificado e NADDRG (Deep Drawing Research Group). Contudo todos estes métodos são apenas aproximações do real e não existe um modelo mais adequado para se obter uma CLC teórica e mais próxima do real. Bleck et al. [15] produziu um comparativo entre estes três métodos citados e demonstrou que nenhum descreve adequadamente o formato da curva e não foi possível determinar com precisão o

valor do ponto  $CLC_0$  (deformação limite no estado plano de deformação, a qual normalmente expressa a menor deformação encontrada na CLC).

Para realização da simulação do ensaio de cinco punções foi necessária a obtenção de uma CLC teórica para o material UNS S32304 para que esta sirva como critério de falha. O método utilizado para determinação da CLC foi o NADDRG. Este modelo foi proposto de forma a simplificar a determinação experimental e teórica da CLC [15], por isso sua escolha. Com este método é possível obter o valor de  $CLC_0$  utilizando o valor da espessura da chapa do material e o seu índice de encruamento ( $n$ ). Através da Equação 1 é possível obter assim a  $CLC_0$ .

$$CLC_0 = Q \cdot (0,233 + t_c \cdot t) \quad (1)$$

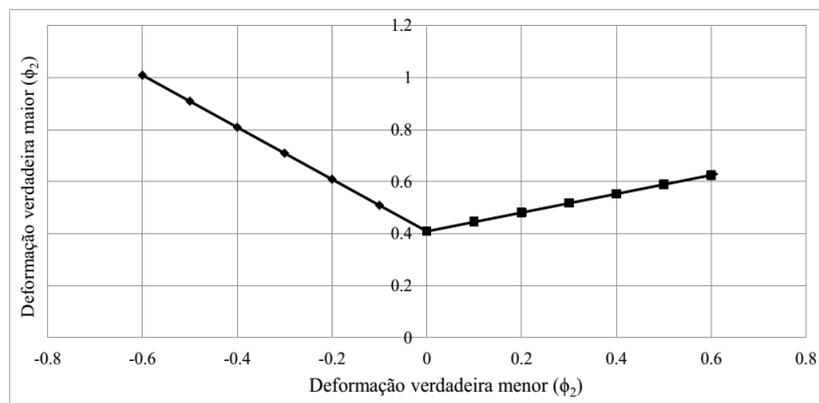
Onde  $Q$  é obtido através da Equação 2 se o índice de encruamento ( $n$ ) for menor que 0,21. Caso  $n$  seja maior, utiliza-se então  $Q=1$ . A espessura é  $t$  e  $t_c$  é o coeficiente de espessura que é igual a 0,141 para o S.I..

$$Q = \frac{n}{0,21} \quad (2)$$

Para o material UNS S32304 o índice de encruamento é igual 0,25 (maior que 0,21), então se utiliza  $Q=1$ . A espessura da chapa utilizada é igual a 1,25 mm, desta forma o valor encontrado para a  $CLC_0$  é:

$$CLC_0 = 1 \cdot (0,233 + 0,141 \cdot 1,25) = 0,41$$

Através do método NADDRG depois de encontrado o  $CLC_0$  projeta-se duas retas a partir deste valor, uma pro lado esquerdo com  $45^\circ$  em relação ao eixo da deformação  $\phi_2$  e outra pro lado direito com  $20^\circ$  em relação ao mesmo eixo [15]. Na Figura 4 é possível observar a curva obtida através do método NADDRG.



**Figura 4.** Curva Limite de Conformação teórica para o material UNS S32304 através do método NADDRG.

## 2.3 Simulação Numérica

Todos os punções possuem diâmetros iguais a 50 mm e a simulação foi executada para cada formato de punção variando o diâmetro da geratriz em 5 mm no intervalo de 80 mm a 110 mm e assim obter a razão-limite de estampagem para os punções utilizados.

Com software comercial Simufact.forming 12.0® foi possível simular numericamente o ensaio de cinco punções para o material UNS S32304. O processo simula uma prensa hidráulica de velocidade constante, onde a matriz executa o movimento e o prensa chapas se mantêm como rígido, aplicando uma força constante. A tensão de

escoamento foi definida pela expressão  $\sigma = C \cdot \varphi^N$ , onde  $C$  é o coeficiente de resistência,  $N$  o índice de encruamento e  $\varphi$  a deformação. O modelo de anisotropia utilizado foi o de Hill e o critério de falha pela CLC.

Para cada caso o software gerou valores de FLP (*Forming Limit Parameter*) em toda a peça e seus valores são menores que um para a região segura ou maiores que um na região de ruptura. Na Figura 5 está representada à esquerda o conjunto matriz, prensa-chapas, geratriz e punção, o cilíndrico, e a direita, o croqui dos cinco punções utilizados.

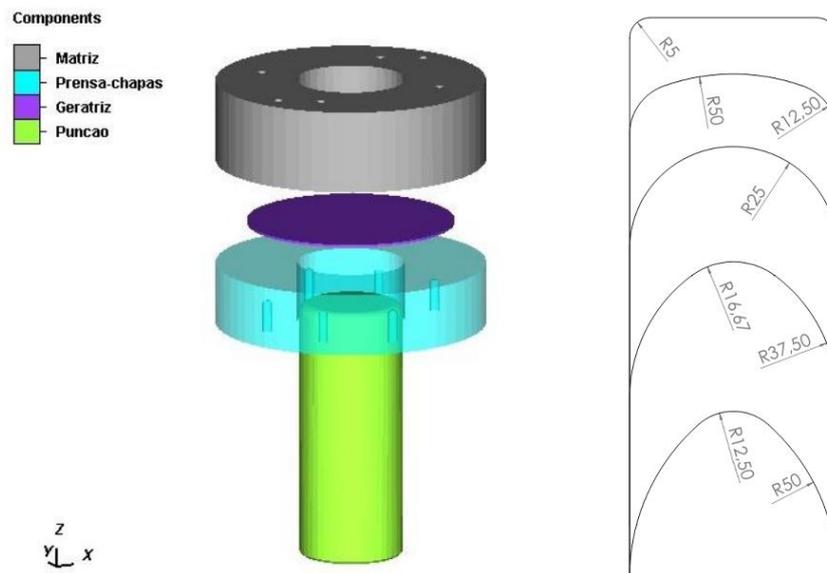


Figura 5. Representação do ensaio de cinco punções.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do ensaio de tração foi possível obter a curva de escoamento característica do material, apresentada na Figura 6, e assim foi possível obter suas propriedades mecânicas, como limite de escoamento e índice de encruamento. Já através do ensaio de anisotropia foi possível obter os índices de anisotropia para os ângulos  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , ilustrados no gráfico da Figura 7. Ainda através do ensaio de anisotropia obteve-se o coeficiente de anisotropia normal e planar. Na Tabela 4 estão apresentados os dados fornecidos por ambos os ensaios.

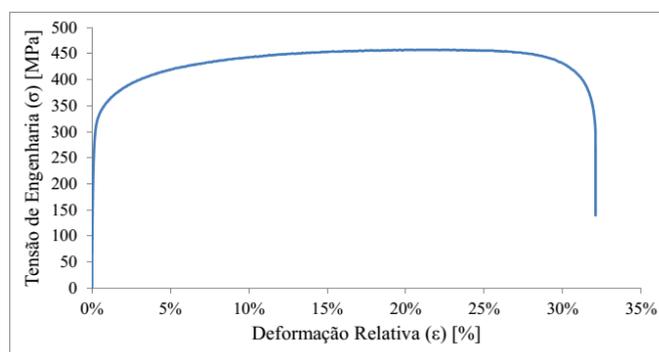


Figura 6. Curva de escoamento do material UNS S32304.

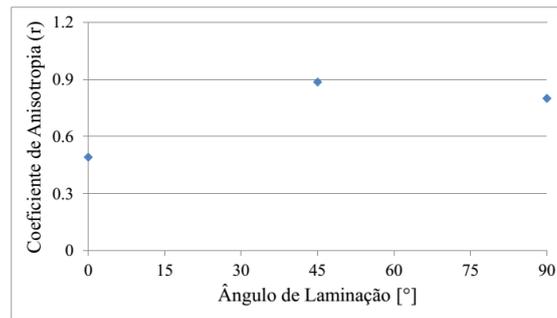


Figura 7. Coeficiente de anisotropia para os ângulos de 0°, 45° e 90°.

Os dados apresentados na Tabela 4 foram utilizados como dados para execução da simulação numérica. Na Figura 8 estão apresentados os resultados das simulações para cada punção com o resultado da última geratriz estampada e da seguinte, que rompeu.

Tabela 4. Resultados do ensaio de tração e anisotropia.

Coeficiente de Young (GPa)	168	Alongamento (%)	30
Tensão de escoamento (MPa)	398,96	Índice de anisotropia 0°	0,49
Tensão de máxima (MPa)	575,75	Índice de anisotropia 45°	0,89
Índice de encruamento	0,25	Índice de anisotropia 90°	0,80
Coeficiente de resistência	648,82	Coeficiente de anisotropia normal	0,77
		Coeficiente de anisotropia planar	-0,24

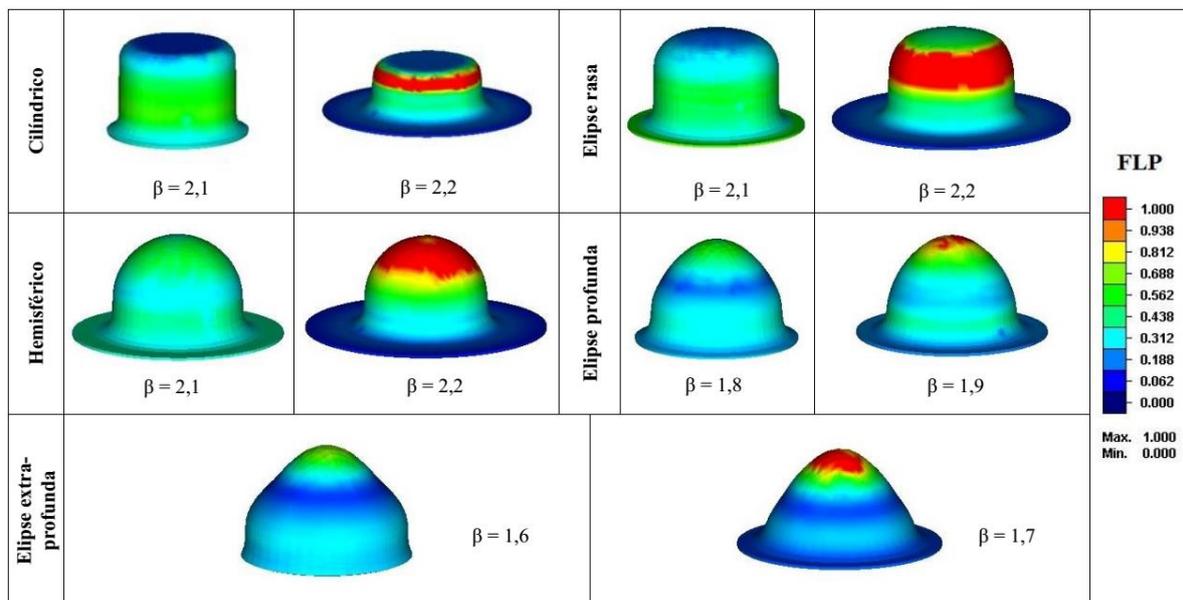


Figura 8. Resultados da simulação para os cinco punções: cilíndrico, elipse rasa, hemisférico, elipse profunda e elipse extra-profunda.

As regiões das deformações da chapa estão expressas em cores, onde a cor vermelha indica o rompimento da peça baseada na CLC. Para cada geometria do punção são observadas duas figuras, sendo a do lado esquerdo uma peça sadia (sem falha) e do lado direito a peça com defeito.

O resultado apresentado pela simulação mostra-se coerente posto que nos punções profundo e extra-profundo, que estão na região de estiramento, as deformações de espessura são altas e concentradas no fundo do copo, como é possível observar na Figura 8, as regiões vermelhas destes dois punções representam o local de falha

onde o FLP alcançou o valor de 1. A partir do resultado obtido através da simulação numérica foi possível estabelecer uma Razão-limite de Estampagem ( $\beta_{\text{máx}}$ ) para cada punção. Na Figura 9 está apresentada uma curva com os valores máximos de  $\beta_{\text{adm}}$ .

Com o gráfico apresentado na Figura 9 foi possível analisar o comportamento do material UNS S32304 em relação aos diferentes formatos de punção. O material se mostrou com boa estampabilidade para deformações na região de embutimento profundo, contudo seu rendimento reduziu muito em relação ao estiramento.

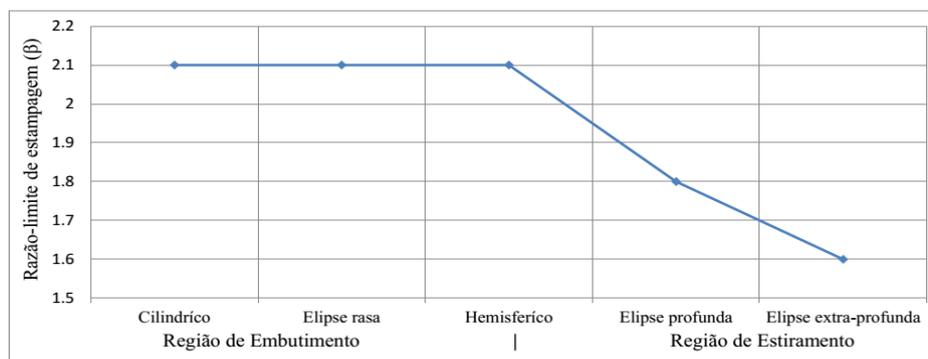


Figura 9. Curva da razão-limite de estampagem teórica do material UNS S32304.

Devido ao coeficiente de anisotropia do material UNS S32304 (0,77) ser abaixo de 1, era esperado uma razão-limite de estampagem abaixo de 2,5. Ocorreu uma queda de rendimento, nos punções de elipse profunda e extra-profunda, pois na região de estiramento as deformações na largura e no comprimento são menores que as deformações na espessura, de forma que a peça irá falhar antes ser completamente estampada. O aço *lean* duplex produzido atualmente possui uma resistência ao escoamento similar ao aço experimental produzido em 1999 [10], entretanto a simulação mostrou que apresentará uma menor RLE, já que para o UNS S32304 o valor é de 2,1 enquanto o aço experimental possuía RLE de 2,12.

#### 4 CONCLUSÃO

O ensaio de cinco punções foi estudado neste trabalho como uma ferramenta para caracterização de materiais com o intuito de analisar a estampabilidade destes. A caracterização mecânica foi utilizada para se obter dados das propriedades do material para utilização no software de simulação computacional. O método de NADDRG foi utilizado para obtenção de uma CLC teórica para o material UNS S32304 para funcionar como critério de falha na simulação numérica de um ensaio de cinco punções para este material, sendo possível chegar as seguintes conclusões:

- O ensaio de cinco punções é capaz de fazer uma análise precisa da estampabilidade do material, pois analisa o comportamento do material nos diversos tipos de deformações que este estará sujeito no processo de conformação de chapas;
- A simulação computacional é uma ferramenta útil para pré-análise da estampabilidade de materiais, além de auxiliar na determinação dos parâmetros do processo e reduzir o número de etapas de projeto;
- O coeficiente de anisotropia normal demonstra forte influencia nos valores alcançados para a Razão-limite de Estampagem, de forma que, materiais que possuem coeficiente maior que 1, são mais facilmente estampados;

- Os aços inoxidáveis tem como sua principal aplicação a resistência à corrosão, durante o seu processo de desenvolvimento características relacionadas com a conformação, como a estampabilidade, ficaram em segundo plano;
- Para processos de estampagem que não possuem a deformação de estiramento, materiais de menor custo como S32304 pode ser utilizado, já que este apresenta desempenho satisfatório na região de embutimento profundo.

## Agradecimentos

Agradecemos a empresa APERAM pelo fornecimento das chapas do material (UNS S32304) utilizadas para análise e produção do artigo.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ferrarini JL. Caracterização de materiais para o processo de estampagem. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.
- 2 Senatore M, Finzetto L, Perea E. Ligas Inoxidáveis Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI. Rem: Revista Escola de Minas. 2007; 60 (1): 175–181.
- 3 Zhang Z, Han D, Jiang Y, Shi C, Li J. Microstructural evolution and pitting resistance of annealed lean duplex stainless steel UNS S32304. Nuclear Engineering and Design. 2012; 243: 56–62.
- 4 Leu D-K. Prediction of the limiting drawing ratio and the maximum drawing load in cup-drawing. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997; 37: 201–213.
- 5 Novotny S, Hein P. Hydroforming of sheet metal pairs from aluminium alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2001; 115 (April): 65–69.
- 6 Ahmadi S, Eivani AR, Akbarzadeh A. Experimental and analytical studies on the prediction of forming limit diagrams. Computational Materials Science. 2009; 44 (4): 1252–1257.
- 7 Tepedino JOA. Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
- 8 Ávila AF, Vieira ELS. Proposing a better forming limit diagram prediction: a comparative study. Journal of Materials Processing Technology. 2003; 141 (1): 101–108.
- 9 Schaeffer L. “Conformação de chapas metálicas.” Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- 10 Andrade MS, Gomes OA, Vilela JMC. Avaliação da estampabilidade de dois aços inoxidáveis austeníticos. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 2003 Maio 18-21; Minas Gerais, Brasil. 2003.
- 11 Arruda RP, Folle LF, Schaeffer L. Simulação avalia ensaio de cinco punções para seleção de materiais. Corte & Conformação de Metais. 2011; 64–71.
- 12 Hennig R. A new technological proofing method. Proceedings of the 7th International Conference on Sheet Metal – SheMet '99. 1999. p. 2–8.
- 13 Guo YQ, Batoz JL, Naceur H, Bouabdallah S, Mercier F, Barlet O. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach. Computers and Structures. 2000; 78: 133–148.
- 14 Lora FA. Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH180 e BH220 utilizado na indústria automobilística. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.
- 15 Bleck W, Deng Z, Papamantellos K, Gusek CO. A comparative study of the forming limit diagram models for sheet steels. Journal of Materials Processing Technology. 1998; 83: 223-230.