

ESTUDO TEÓRICO DA ESTAMPABILIDADE DO AÇO LEAN DUPLEX UNS S32304 ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE CINCO PUNÇÕES

Marcelo Sousa de Carvalho, marcelo.carvalho@fieb.org.br¹

Fábio André Lora, lora@fieb.org.br¹

Juliana Ribeiro Tourinho Dantas Sartori, juliana.sartori@fbest.org.br¹

Rodrigo Santiago Coelho, rodrigo.coelho@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, Salvador-BA, Brasil.

Resumo: Os aços Duplex 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. Estas propriedades derivam da sua microestrutura composta, sobretudo, por uma matriz de ferrita e ilhas de austenita. Assim, visando um aumento, ainda mais significativo, na empregabilidade desses aços, são imprescindíveis os estudos sobre aplicabilidade, tipos de manufatura e conformação. Neste trabalho, estudos baseadas na técnica dos cinco punções foram realizados para avaliar as características de conformação do aço Lean Duplex 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. Este ensaio funciona alternando a forma dos punções, com o intuito de variar os tipos de deformações resultantes. A técnica estende-se desde o estiramento biaxial até o embutimento profundo. Esse trabalho apresenta uma análise teórica 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: Lean duplex, ensaio de cinco punções, conformação de chapas, UNS S32304, razão de estampagem.

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 (Ferrarini, 2004). 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 Lean Duplex UNS S32304

Devido as suas características de alta resistência mecânica e boa resistência à corrosão (Evangelista et al., 2004), os aços duplex ganharam notoriedade em indústrias nas quais tais propriedades são essenciais, como as de petróleo e gás e indústrias químicas (Han et al., 2011). Sua utilização tem como principal motivo à capacidade de unir as características de dois aços inoxidáveis, os austeníticos e os ferríticos, de forma equilibrada. 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 (Senatore et al., 2007). O *lean duplex* possui os mesmos atrativos das ligas de duplex convencionais em relação aos aços-carbono. 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 (Senatore et al., 2007; Zhang et al., 2012). Na Tab. 1 estão expostas as propriedades do UNS S32304 em comparação com outros aços.

Tabela 1: Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis.

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

Fonte: (Senatore et al., 2007)

1.2. Anisotropia

Diversos estudos foram publicados para analisar a influência do coeficiente de anisotropia normal na razão-limite de estampagem (Leu, 1997, 1999; Verma; Chandra, 2006). 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 Fig. (1) que essa relação varia de acordo com o índice de encruamento (n) do material.

Segundo Schaeffer (2004) materiais anisotrópicos possuem valores diferentes para seu índice anisotropia a depender do ângulo em relação à direção de laminação, de forma que o coeficiente de anisotropia normal é diferente de um. Quando este coeficiente for menor que um, a diminuição na espessura é maior do que a diminuição na largura, e quando maior que um ocorre o oposto. Um aumento no coeficiente de anisotropia normal proporciona uma redução na tensão de escoamento no flange enquanto na parede do copo mantêm-se as mesmas (Novotny; Hein, 2001). Desta forma, 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.

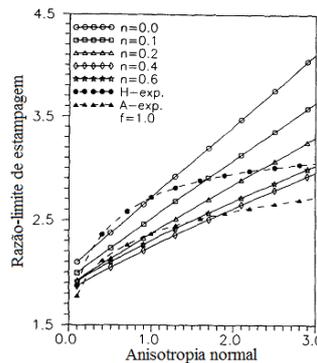


Figura 1. Relação entre o coeficiente de anisotropia normal, a razão-limite de estampagem e o índice de encruamento. Fonte: (Leu, 1997).

1.3. Curva Limite de Conformação

A Curva de Limite de Conformação (CLC) é um parâmetro importante para caracterização da estampabilidade de chapas durante o processo de conformação. Através desta é possível determinar a capacidade máxima de deformação tolerada por um material quando sujeito ao processo de estampagem (Ahmadi et al., 2009; Tepedino, 2014).

A CLC é um critério que se baseia no limite suportado pelo material quando submetido a diferentes tipos de deformação gerados no decorrer do processo, como o embutimento e o estiramento (Netto, 2004; Tepedino, 2014). A utilização da CLC como uma ferramenta para seleção de materiais tornou-se extensiva devido às informações obtidas através desta curva, de forma que esta passou a ser empregada para prever possíveis falhas do material durante o processo de conformação (Kaluzza et al., 2002). A CLC não é uma propriedade intrínseca do material podendo ser alterada conforme variação da espessura da chapa e do lubrificante.

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 (Ávila; Vieira, 2003; Bressan et al., 2011; Tepedino, 2014).

Para que a peça conformada não possua rupturas as combinações das deformações verdadeiras ϕ_1 (maior) e ϕ_2 (menor), na superfície da chapa, devem estar na região abaixo da CLC. Sendo assim, os pontos acima da curva representam a região de ruptura (Tepedino, 2014). A Fig. (2) ilustra uma CLC e suas regiões.

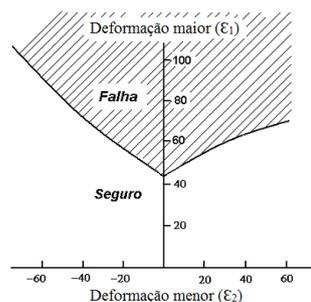


Figura 2. Regiões da CLC com e sem possibilidade de ruptura. Fonte: (Tepedino, 2014)

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 (Arruda et al., 2011). No processo de conformação de chapas o material é submetido a diferentes tipos de deformações como embutimento e estiramento, sendo importante conhecer quais os efeitos que estas deformações provocam na matéria-prima do projeto. Através do ensaio de cinco punções, primeiramente proposto por Hennig (1999), é possível analisar tais efeitos no material. Desta forma, este ensaio faz-se necessário posto que os projetos de peças estampadas, normalmente complexas, possuem regiões que estarão sujeitas a mais de um tipo de deformação ou até mesmo uma combinação destas.

Os efeitos causados pelo embutimento e pelo estiramento são bastante distintos, sendo possível analisa-los com a alternância dos punções. No caso do embutimento profundo, o tipo de deformação aplicada pelo punção cilíndrico, não há deformação na direção da espessura (φ_3), a deformação verdadeira maior (φ_1) é positiva e a verdadeira menor (φ_2) negativa, e iguais em módulo. A deformação verdadeira maior está na direção do comprimento enquanto a φ_2 está na largura. Já quando o tipo de deformação é o estiramento biaxial (punção de elipse extra-profunda, por exemplo) as deformações φ_1 e φ_2 são positivas e iguais, sendo assim a deformação φ_3 , pela Lei da Constância do Volume, negativa (de compressão) e igual em módulo ao dobro de φ_1 (Netto, 2004).

Desta forma, observa-se que as deformações na espessura são muito mais severas no estiramento que no embutimento. Hennig (1999) demonstra através de gráficos a variação das deformações na largura, no comprimento e na espessura para os cinco formatos de punção e o que se observa é justamente a variação nas deformações da espessura entre o embutimento (menor) e o estiramento (maior). Na Fig. (3) estão ilustrados estes gráficos para os punções de elipse rasa, hemisférico, de elipse profunda e de elipse extra-profunda.

Esta técnica baseia-se na obtenção da Razão-limite de Estampagem ($\beta_{m\acute{a}x}$) para diferentes tipos de punção. Este parâmetro é definido pela Eq. (1) e determina o limite da passagem de uma geratriz com diâmetro (D) para um corpo estampado com diâmetro (d), diâmetro do punção (Schaeffer, 2004).

$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{D}{d} \quad (1)$$

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 solicitação o material é mais adequado para se utilizar e qual estará mais propício a falhar (Arruda et al., 2011; Hennig, 1999).

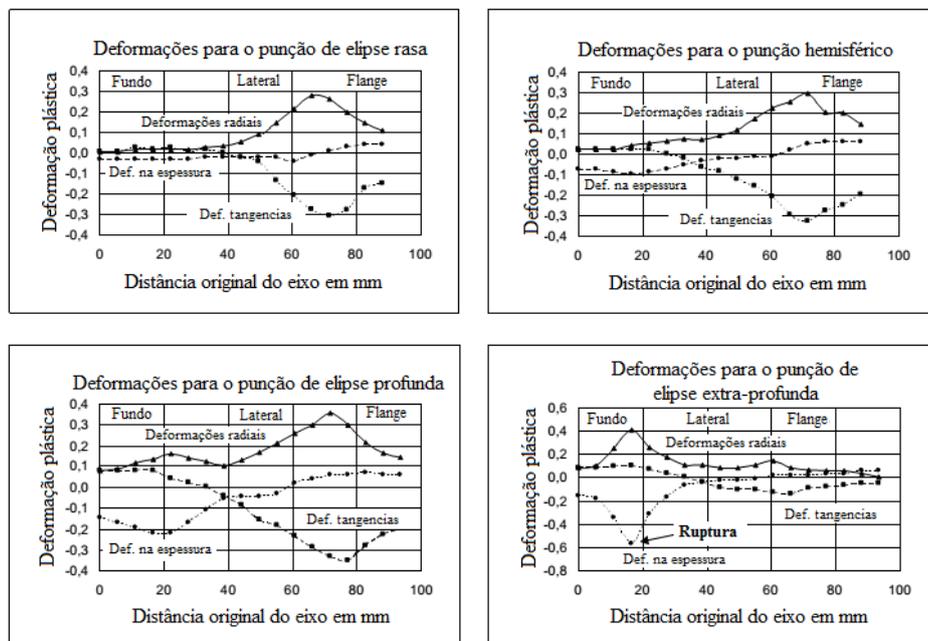


Figura 3. Gráfico representando a deformação plástica em relação à distância original do eixo em milímetros para os três tipos de deformação. Fonte: (Hennig, 1999).

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 ampla aplicação também promoveu seu desenvolvimento ao passo que atualmente é possível produzir análises com diversos tipos de parâmetros (Naceur et al., 2004, 2001; Naceur et al., 2004). Desta forma, sua constante evolução na indústria de conformação de chapas proporcionou uma maior avaliação das deformações e defeitos ocasionados durante este processo (Guo et al., 2000).

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. Segundo Shi et al. (2004) o próximo passo é ir além e adotar ambas, a simulação numérica e a otimização, de forma que a simulação não apresente apenas os resultados da combinação de alguns parâmetros, mas também um melhor planejamento do processo, desde a geometria da geratriz, o formato das ferramentas até os parâmetros do processo. Na Fig. (4) 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.

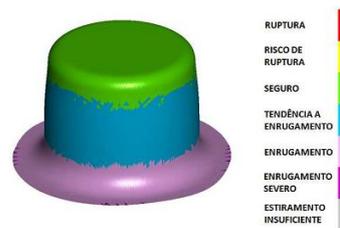


Figura 4. Copo de aço BH 180 produzido no processo de simulação numérica.
Fonte: (Lora, 2009).

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 como demonstrado na Fig. (5). 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.

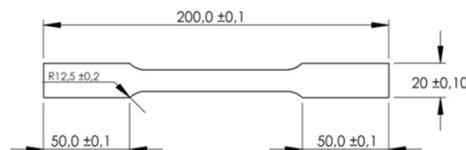


Figura 5. Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração e anisotropia (dimensões em milímetros).

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 (2014) 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* (*North American 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. (1998) 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). Os resultados obtidos mostraram que cada método pode ser mais eficiente para alguns materiais do que outros como se pode analisar na Fig. (6).

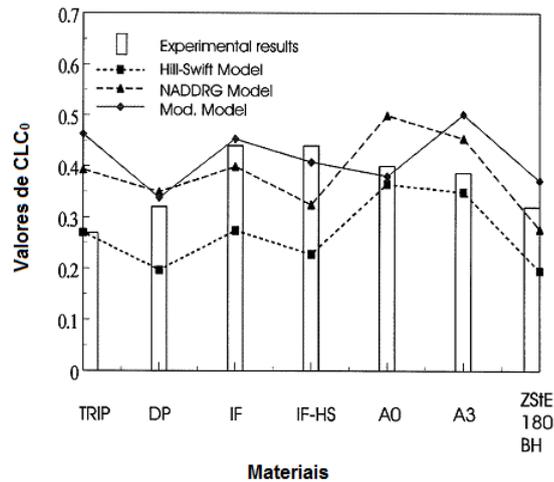


Figura 6. Comparação entre o valor teórico e experimental para CLC_0 .
Fonte: (Bleck et al., 1998)

Para realização da simulação do ensaio de cinco punções foi necessária à obtenção de uma CLC teórica pra 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, de forma a ser utilizada mais facilmente (Bleck et al., 1998), 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 Eq. (2) é possível obter assim a CLC_0 .

$$CLC_0 = Q \cdot (0,233 + t_c \cdot t) \quad (2)$$

onde Q é obtido através da Eq. (3) 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..

$$Q = \frac{n}{0,21} \quad (3)$$

Para o material UNS S32304 o índice de encruamento é igual 0,25 (maior que 0,21), então utiliza-se $Q = 1$. 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° em relação ao eixo da deformação ϕ_2 e outra pro lado direito com 20° em relação ao mesmo eixo (Bleck et al., 1998). Na Fig. (7) é possível observar a curva obtida através do método NADDRG.

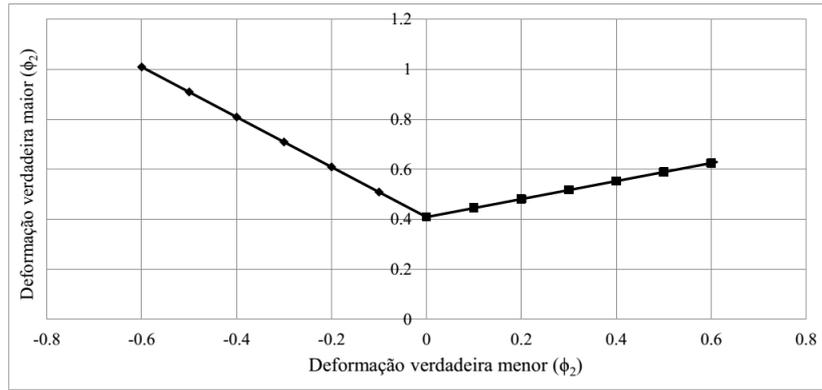


Figura 7. Curva Limite de Conformação teórica para o material UNS S32304 através do método NADDRG.

2.3. Simulação Numérica

Na Fig. (8) está representada à esquerda o conjunto matriz, prensa-chapas, geratriz e punção, o cilíndrico, e a direita, o croqui dos cinco punções utilizados.

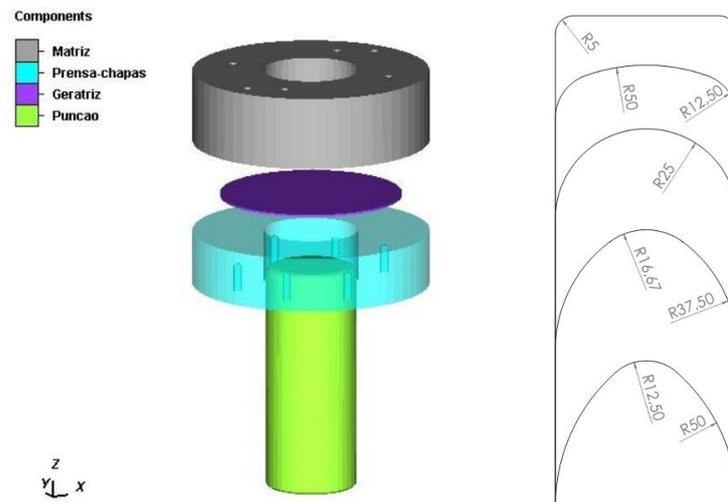


Figura 8. Representação do ensaio de cinco punções.

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 mantém como rígido, aplicando uma força constante. A tensão de escoamento foi definida pela expressão $\sigma = C \cdot \phi^N$, onde C é o coeficiente de resistência, N o índice de encruamento e ϕ 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. Este parâmetro é definido através da Eq. (4) e seus valores são menores que um para a região segura ou maiores que um na região de ruptura.

$$FLP = \phi_1 / CLC(\phi_2) \tag{4}$$

A $CLC(\phi_2)$ é a curva CLC, obtida pelo modelo NADDRG, em função de ϕ_2 e que irá ser definida pela Eq. (5) e pela Eq. (6). A Fig. (9) ilustra a CLC entre as regiões para FLP maiores que um e menores que um.

$$CLC(\phi_2) = CLC_0 - 1 \cdot \phi_2 \quad (\phi_2 \geq 0) \tag{5}$$

$$CLC(\phi_2) = CLC_0 + 0,36 \cdot \phi_2 \quad (\phi_2 \leq 0) \tag{6}$$

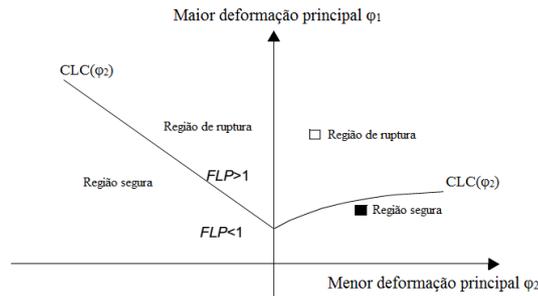


Figura 9. Regiões definidas pelos valores de FLP.
Fonte: Simufact.forming®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do ensaio de tração foi possível obter a curva de escoamento característica do material, apresentada na Fig. (10), 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°, 45° e 90°, ilustrados no gráfico da Fig. (11). Ainda através do ensaio de anisotropia obteve-se o coeficiente de anisotropia normal e planar. Na Tab. (2) estão apresentados os dados fornecidos por ambos os ensaios.

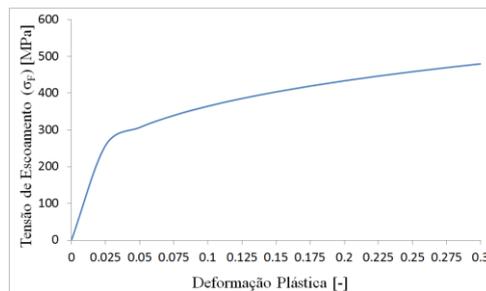


Figura 10. Curva de escoamento do material UNS S32304.

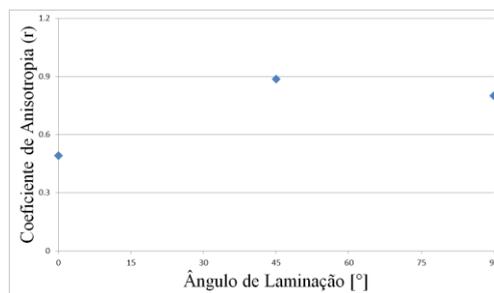


Figura 11. Coeficiente de anisotropia para os ângulos de 0°, 45° e 90°.

Tabela 2. Resultados do ensaio de tração e anisotropia

Coeficiente de Young (GPa)	168
Tensão de escoamento (MPa)	352,28
Tensão de máxima (MPa)	480,18
Índice de encruamento	0,25
Coeficiente de resistência	648,82
Alongamento (%)	30
Índice de anisotropia 0°	0,49
Índice de anisotropia 45°	0,89
Índice de anisotropia 90°	0,80
Coeficiente de anisotropia normal	0,77
Coeficiente de anisotropia planar	-0,24

Os dados apresentados na Tab. (2) foram utilizados como dados para execução da simulação numérica. Na Fig. (12) estão apresentados os resultados das simulações para cada punção com o resultado da última geratriz estampada e da seguinte, que rompeu.

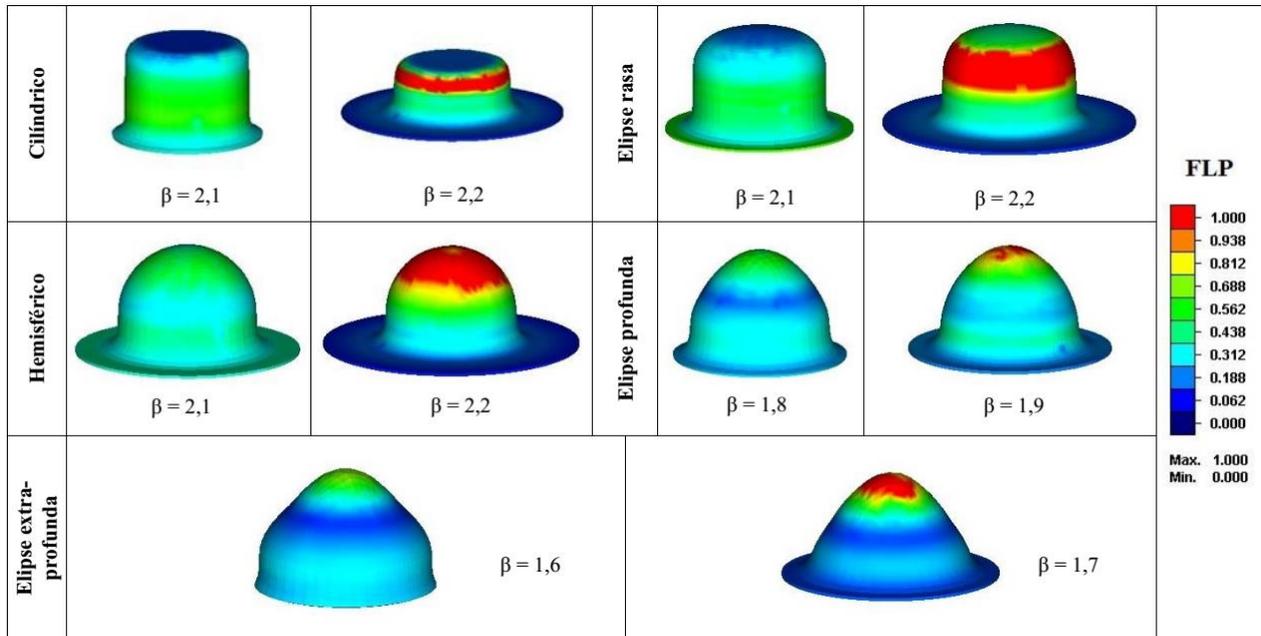


Figura 12. Resultados da simulação para os cinco punções: cilíndrico, elipse rasa, hemisférico, elipse profunda e elipse extra-profunda.

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 sã (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 Fig. (12), 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 ($\beta_{máx}$) para cada punção. Na Fig. (13) está apresentada uma curva com os valores máximos de β_{adm} .

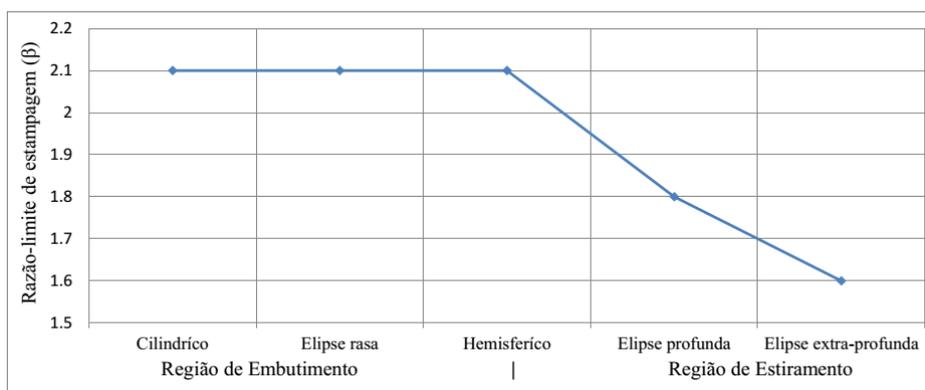


Figura 13. Curva da razão-limite de estampagem teórica do material UNS S32304.

Com o gráfico apresentado na Fig. (13) 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.

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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 boa análise 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;
- O aço *Lean Duplex* UNS S32304 possui melhor desempenho em processos de embutimento profundo do que estiramento, sendo seu coeficiente de anisotropia, abaixo de 1, o principal motivo para sua menor Razão-limite de estampagem.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Ahmadi, S.; Eivani, A. R.; Akbarzadeh, A. "Experimental and analytical studies on the prediction of forming limit diagrams." *Computational Materials Science*, v. 44, n. 4, p. 1252–1257, fev. 2009.
- Arruda, R. P. DE; Folle, L. F.; Schaeffer, L. "Simulação avalia ensaio de cinco punções para seleção de materiais." *Corte & Conformação de Metais*, p. 64–71, 2011.
- Ávila, A. F.; Vieira, E. L. S. "Proposing a better forming limit diagram prediction: a comparative study." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 141, n. 1, p. 101–108, out. 2003.
- Bleck, W.; Deng, Z.; Papamantellos, K.; Gusek, C. O. "A comparative study of the forming-limit diagram models for sheet steels." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 83, p. 223–230, 1998.
- Bressan, J. D.; Tigrinho, L. M. V.; Santos, R. A. DOS; Marcondes, P. "Previsão teórica da curva CLC e comparação com resultados experimentais de chapas do aço DC 06 obtidos com ensaios de Nakazima e Marciniak." 2011.
- Evangelista, E.; McQUEEN, H. J.; Niewczas, M.; Cabibbo, M. "Hot Workability of 2304 and 2205 Duplex Stainless Steels." *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 43, n. 3, p. 339–353, 1 jan. 2004.
- Ferrarini, J. L. "Caracterização de materiais para o processo de estampagem." Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- Guo, Y. Q.; Batoz, J. L.; 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*, v. 78, p. 133–148, 2000.
- Han, D.; Jiang, Y.; Shi, C.; Li, Z.; Li, J. "Influence of the microstructure and alloying element on the polarization behaviour within the crevice of UNS S32304 duplex stainless steel." *Corrosion Science*, v. 53, n. 11, p. 3796–3804, nov. 2011.
- Hennig, R. "A new technological proofing method." *Proceedings of the 7th International Conference on Sheet Metal – SheMet '99*, p. 2–8, 1999.
- Kaluza, W.; Kim, I.; Bleck, W. "Determination of Forming Limit Stress Diagrams for the Characterization of Material for Sheet Metal Forming." *Advanced Engineering Materials*, v. 4, n. 4, p. 191–195, 9 abr. 2002.
- Leu, D.-K. "Prediction of the limiting drawing ratio and the maximum drawing load in cup-drawing." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 37, p. 201–213, 1997.
- Leu, D.-K. "The limiting drawing ratio for plastic instability of the cup-drawing process." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1-3, p. 168–176, fev. 1999.
- Lora, F. A. "Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística." Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

- Naceur, H.; Delaméziere, A.; Batoz, J. L.; Guo, Y. Q.; Knopf-Lenoir, C. "Some improvements on the optimum process design in deep drawing using the inverse approach." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 146, p. 250–262, 23 jan. 2004.
- Naceur, H.; Guo, Y. ; Batoz, J. .; Knopf-Lenoir, C. "Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process." *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 43, n. 10, p. 2407–2434, out. 2001.
- Naceur, H.; Guo, Y. Q.; Batoz, J. L. "Blank optimization in sheet metal forming using an evolutionary algorithm." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 151, n. 1-3, p. 183–191, set. 2004.
- Netto, S. E. "Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação." Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- Novotny, S.; Hein, P. "Hydroforming of sheet metal pairs from aluminium alloys." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 115, n. April, p. 65–69, 2001.
- Schaeffer, L. "Conformação de chapas metálicas." Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. p. 200
- Senatore, M.; Finzetto, L.; Perea, E. "Ligas Inoxidáveis Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI." *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 1, p. 175–181, 2007.
- Shi, X.; Chen, J.; Peng, Y.; Ruan, X. "A new approach of die shape optimization for sheet metal forming processes." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 152, n. 1, p. 35–42, out. 2004.
- Tepedino, J. O. A. "Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas." Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- Verma, R. K.; Chandra, S. "An improved model for predicting limiting drawing ratio." *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 2, p. 218–224, fev. 2006.
- 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*, v. 243, p. 56–62, fev. 2012.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THEORETICAL STUDY OF FORMABILITY OF LEAN DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32304 THROUGH THE NUMERICAL SIMULATION OF FIVE PUNCH TEST

Marcelo Sousa de Carvalho, marcelo.carvalho@fieb.org.br¹

Fábio André Lora, lora@fieb.org.br¹

Juliana Ribeiro Tourinho Dantas Sartori, juliana.sartori@fbest.org.br¹

Rodrigo Santiago Coelho, rodrigo.coelho@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, Salvador-BA, Brasil.

Abstract: The Duplex 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. These properties derived from the microstructure composed mainly of a matrix of ferrite and austenite islands. In order to increase even more the employability of these steels, studies on different applications, types of manufacturing and forming are essential. In this work, studies based on the five punch test were performed to evaluate the formability of the lean duplex 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 test works by switching the shape of the punches in order to vary the types of resulting deformation. The technique extends from biaxial stretching to deep drawing. This paper presents a theoretical 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: Lean duplex, five punch test, sheet metal forming, UNS S32304, limit drawing ratio.