

ANÁLISE NUMÉRICA DA FORÇA DO PRENSA CHAPAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE ESTAMPAGEM PARA O AÇO DUPLEX UNS S32205

Juliana R. T. D. Sartori¹, Raoni B. de Oliveira¹, Marcelo S. de Carvalho¹; Fábio A. Lora¹ e Rodrigo S. Coelho¹

¹ SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, E-mails: juliana.sartori@fieb.com; raoni.oliveira@fieb.org.br; marcelo.carvalho@fieb.org.br; lora@fieb.org.br e rodrigo.coelho@fieb.org.br.

RESUMO

As excelentes propriedades mecânicas associadas à elevada resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex resultam no seu crescente uso, principalmente dentro da indústria química e petroquímica. Um dos meios de manufatura de peças e componentes deste tipo de aço é a conformação de chapas. Durante o embutimento profundo, a fratura ou o enrugamento são os principais modos de falhas. Esses defeitos, por sua vez, podem ser evitados com a utilização da força do prensa-chapas (FPC) dentro dos limites apropriados para uma dada relação de estampagem (β). O presente trabalho tem como objetivo determinar o limite máximo da FPC em função de diferentes relações de estampagem para uma chapa de aço inoxidável duplex UNS S32205 com 1,2 mm de espessura. Para tal, foram realizadas simulações numéricas dos processos de embutimento profundo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Através desta análise, foi possível encontrar a curva da FPC máxima ($FPC_{m\acute{a}x}$) em função de diferentes relações de estampagem (β) além de determinar o $\beta_{m\acute{a}x}=2,10$ para a chapa de aço inoxidável duplex UNS 32205.

Palavras-Chaves: *Embutimento profundo; aços inoxidáveis duplex UNS 32205; força do prensa-chapas; relação de estampagem; ensaio Swift.*

ABSTRACT

Excellent mechanical properties associated with high corrosion resistance of stainless steels result in its increased utilization, particularly in the chemical and petrochemical industry. One of manufacturing means of pieces and components of this type of steel is the sheet metal forming. During the deep-drawing process, fracture or wrinkling is the main modes of failure. These defects, in turn, can be avoided by using the blank-holder force (BHF) within the appropriate limits for a given drawing ratio (β). The present study aims to determine the maximum BHF in function of different drawing ratio for duplex stainless steel UNS S32205 sheet metal with thickness of 1,2 mm. To this end, numerical simulations, by Finite Element Methods (FEM), of deep drawing processes were performed. Through this analysis, it was possible to find the curve of maximum FPC versus different drawing ratios (β) as well as to determine $\beta_{max} = 2,10$ for duplex stainless steel UNS S32205 sheet metal.

Keywords: *Deep-drawing; Stainless steel UNS S32205; Blank-holder force; Drawing ratio; Swift test.*

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis possuem em sua composição química, no mínimo, 12% de cromo, fato que confere um aumento da sua resistência à corrosão devida à formação de uma fina camada passivante de óxido mistos, principalmente de ferro e de cromo. Os aços inoxidáveis classificados como duplex (AID) tem, por sua vez, a microestrutura constituída por duas fases distintas e em frações volumétricas aproximadamente iguais: uma ferrítica e outra austenítica. Esses aços são caracterizados por uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: têm elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência à corrosão muito boa em diversos meios e excelente resistência à corrosão sob tensão e à fadiga [1].

Dentre os AID um dos mais conhecidos e aplicados é o UNS S32205 (conhecido também como UNS S31803 e SAF2205), correspondendo a mais de 80% da produção mundial desse tipo de aço. Devido a suas propriedades químicas e mecânicas, este é amplamente utilizado na fabricação de equipamentos *offshore* e nas indústrias de óleo e gás, papel e celulose, de processamento químico e de geração de energia [1].

Parte das aplicações do AID requer algum tipo de conformação mecânica a frio, a exemplo da estampagem. O seu alto limite de escoamento, cerca de 30 a 50% maior que aços carbonos e aços inoxidáveis ferríticos, possibilita uma redução da espessura da peça final, porém, com o consequente aumento da força mínima requerida para a conformação. A alta dureza e baixa ductilidade dos duplex (comparados com os inoxidáveis austeníticos), por sua vez, também devem ser levadas em consideração na sua conformação a frio [2].

Um processo muito utilizado industrialmente, o embutimento profundo (também denominado por estampagem profunda ou repuxo) consiste na fabricação de um produto cilíndrico ou cônico a partir de uma geratriz (*blank*) pela imposição de esforços de tração e compressão através de um ferramental rígido. Neste processo, a qualidade da peça fabricada é fortemente influenciada pela quantidade de material escoado para dentro da cavidade da matriz. Um escoamento insuficiente de metal pode vir a causar fratura assim como um escoamento excessivo tem a possibilidade de acarretar enrugamento. A escolha da força a ser empregada ao prensa-chapas (FPC) dentro dos limites adequados é uma medida efetiva para controle do fluxo de material durante o processo e, conseqüentemente, para evitar esses dois principais modos de falhas [3].

A relação de estampagem (β) é definida pela relação entre o diâmetro da geratriz (D) e o do copo estampado (d). O embutimento profundo somente pode ser realizado dentro de certos limites deste parâmetro, relação de estampagem máxima admissível ($\beta_{máx}$) [4].

O método experimental mais comumente utilizado para a determinação da Razão Limite de Estampagem (RLE), equivalente à $\beta_{m\acute{a}x}$, é o Ensaio Swift. Este ensaio tecnológico consiste na realização de sucessivos embutimentos com o aumento gradativo do diâmetro do *blank* (D) até que o processo finde na falha do material antes que a estampagem profunda seja completada [5].

Durante o projeto de uma peça estampada ou da análise de estampabilidade de um determinado material, a simulação numérica torna-se um poderoso instrumento. A utilização de softwares especializados na simulação de estampagem possibilita a otimização do ciclo de desenvolvimento do produto, pela redução de consumo de materiais, diminuição de tempo de projeto, previsão da forma final, redução de custos, previsão de falhas, ajuste adequados de parâmetros de processo e análise termomecânica da peça e do ferramental.

O presente trabalho utiliza a simulação numérica dos processos de embutimento profundo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com o objetivo de se determinar, teoricamente, o limite máximo da FPC ($FPC_{m\acute{a}x}$) em função de diferentes relações de estampagem (β) para uma chapa de aço inoxidável duplex UNS S32205 com 1,2mm de espessura. Através dessa análise, foi possível encontrar a curva da $FPC_{m\acute{a}x}$ em função das relações de estampagem (β) além de determinar o $\beta_{m\acute{a}x}$ para a chapa de aço UNS 32205. Pretende-se que a curva obtida por simulação torne-se um instrumento orientativo satisfatório no planejamento de futuros experimentos para a verificação do comportamento à estampagem profunda do AID UNS S32205, viabilizando a redução do número de etapas experimentais necessárias para que se alcance o $FPC_{m\acute{a}x}$.

METODOLOGIA

Material

Foram utilizadas chapas com espessura igual a 1,2 mm de aço inoxidável duplex UNS S32205; fabricadas pela Aperam®. A sua composição química está mostrada na tabela 1. Tabela 10. Composição química do AID UNS 32205 [6]

UNS S32205	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)
	0.0187	1.8192	0.2577	0.0276	0.0002	22.4049	5.3047	3.0044	0.0038
	Cu (%)	Co (%)	V (%)	Nb (%)	Ti (%)	Sn (%)	W (%)	N2 (%)	
0.1876	0.0725	0.0298	0.0118	0.0084	0.0030	0.0141	0.1531		

Ensaio de Tração e Anisotropia

Sabendo-se que as chapas metálicas são fabricadas através da laminação, o encruamento diferencial dos grãos de acordo com o sentido deste processo de fabricação acarreta em um diferencial de resistência mecânica conforme o sentido de solicitação [7]. Esta característica é definida numericamente pelo índice de anisotropia (r), calculado de acordo com equação 1 [8].

$$r = \frac{\phi_b}{\phi_e} = \frac{\ln(b_0/b)}{\ln(Lb/L_0b_0)} \quad (1)$$

Os valores de ϕ_b e ϕ_e podem ser obtidos através do ensaio de anisotropia, sendo a deformação verdadeira na largura e na espessura, respectivamente, do corpo de prova. Uma vez que a medição da variação de espessura pode ocasionar erro, o índice de anisotropia é mais facilmente calculado em função do comprimento (L) e da largura (b).

Com o objetivo de se obter as propriedades mecânicas, o aço inoxidável duplex UNS S32205 foi submetido a ensaios de tração e de anisotropia, utilizando um equipamento da marca EMIC com capacidade de 30 toneladas. Para tal, foram confeccionados 24 corpos de prova conforme a norma ASTM E 8M [9] (dimensões expostas na figura 1); sendo parte com a maior dimensão a 0° em relação à direção de laminação da chapa; outros a 45° e outros a 90°.

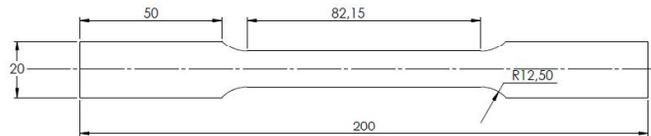


Figura 13. Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e de anisotropia (dimensões em milímetros). Fonte: Autores.

Durante os ensaios de tração, corpos de prova foram submetidos à força trativa axial à velocidade constante até que se alcançasse seu rompimento. Como resultado, a máquina fornece as forças (em Newton) aplicadas pela célula de carga em função do deslocamento medido pelo extensômetro (em milímetro), fundamentais para a construção da curva tensão versus deformação do material. Os ensaios de anisotropia, por sua vez, foram realizados de maneira semelhante aos de tração; sendo interrompidos quando os corpos de prova experimentaram um aumento de 17% do seu comprimento útil (dentro do limite de 15 a 20% exigido pela norma ASTM E517-00) [10], não havendo ruptura. Ao final, foram medidos os valores de comprimento e largura resultante, possibilitando o cálculo dos coeficientes de anisotropia.

Uma vez determinado o índice de anisotropia para cada direção de laminação (paralelo, perpendicular e transversal), pode-se avaliar a diferença no comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa através do índice de anisotropia planar (Δr), calculado de acordo com a equação 2, e do coeficiente de anisotropia normal (R_{med}), calculado de acordo com a equação 3 [7].

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2)$$

$$R_{med} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3)$$

Curva Limite de Conformação

A conformabilidade de uma chapa metálica pode ser caracterizada através da Curva Limite de

Conformação (CLC). Esta determina o limite das deformações que podem ser aplicadas a um material, uma vez que a região abaixo da curva é de conformação segura e acima dela indica ruptura, falha [6].

Para simplificar a determinação experimental e prática da CLC e poder utilizá-la mais facilmente, o North American Deep Drawing Research Group (NADDRG) sugeriu uma metodologia empírica: através da equação 4 encontra-se a máxima deformação limite de conformação (ε_{10}) correspondente à deformação plana (quando $\varepsilon_2 = 0$), para uma chapa com espessura (t) menor que três milímetros e índice de encruamento (n) menor que 0,21. A CLC é então composta por duas curvas a partir do ε_{10} : uma à esquerda a 45° e a outra à direita a 20° [11].

$$\varepsilon_{10}(\%) = (23,3 + 14,13 \cdot t) \cdot \frac{n}{0,21} \quad (4)$$

Esse método foi utilizado para a obtenção da CLC do AID UNS S32205, a qual foi utilizada como critério de falha na simulação do ensaio Swift.

Simulação Numérica

Para realização do presente trabalho foi utilizado o *software* comercial *Simufact.forming12.0*® para a simulação numérica, através do MEF, do ensaio Swift realizado em chapas de AID UNS S32205 (de acordo com a figura 2). Objetivou-se inicialmente definir os limites máximos da FPC em função de diferentes β assim como estabelecer a $\beta_{m\acute{a}x}$ deste material.

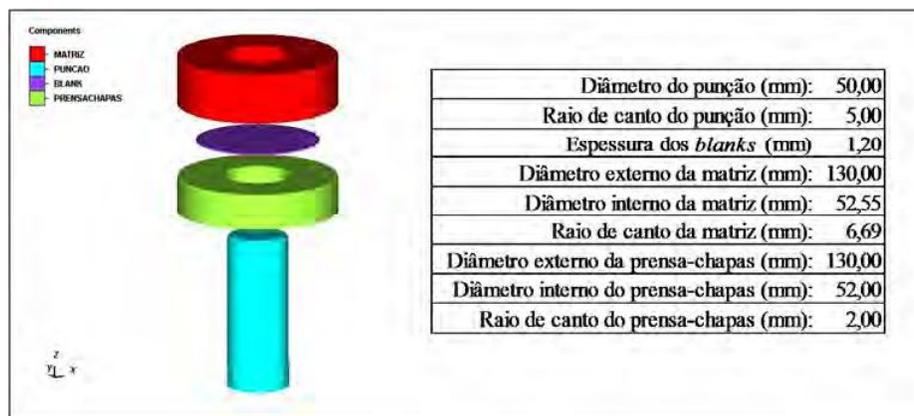


Figura 14. Conjunto de componentes para a simulação do ensaio Swift no *Simufact.forming*® com as suas respectivas dimensões. Fonte: Autores

Os diferentes *blanks* simulados têm diâmetros variando entre 90 mm e 120 mm (β de 1,8 a 2,4). A prensa hidráulica considerada tem velocidade constante igual a 8 mm/s provocando o deslocamento da matriz enquanto o prensa-chapas se mantém rígido exercendo a FPC (constante ao longo do processo). As malhas de elementos finitos geradas em todos os *blanks* foram do tipo *sheetmesh* com elementos *hexahedral* com tamanho médio de 2,5 mm. Já os atritos, tanto entre a matriz e o *blank* quanto entre o prensa-chapas e o *blank*, foram

configurados como obedecendo à lei de Coulomb com coeficiente de atrito (μ) constante e igual a 0,1.

Através dos dados obtidos pelos ensaios de tração e de anisotropia realizados, assim como pelos fornecidos pelo fabricante das chapas metálicas de AID UNS S32205 (a Aperam); foi possível utilizar na simulação numérica o modelo de anisotropia de Hill e a CLC como critério de falha.

Ao final de cada simulação foram obtidos os valores da FLP (*forming limit parameter*) para cada ponto da malha de elementos finitos; o qual é definido pela equação 5 [12].

$$FLP = \phi_1 / CLC(\phi_2) \quad (5)$$

Sendo a deformação máxima representada por ϕ_1 , a deformação mínima representada por ϕ_2 e a CLC (ϕ_2) definida pelo modelo de NADDRG, de acordo com as equação 6 e equação 7 [12].

$$CLC(\phi_2) = \varepsilon_{10} - 1 \cdot \phi_2 \quad (\phi_2 \geq 0) \quad (6)$$

$$CLC(\phi_2) = \varepsilon_{10} + 0,36 \cdot \phi_2 \quad (\phi_2 \leq 0) \quad (7)$$

Como pode ser observado na figura 3, as regiões de ruptura possuem FLP maior que um já as regiões seguras possuem FLP menor que a unidade.

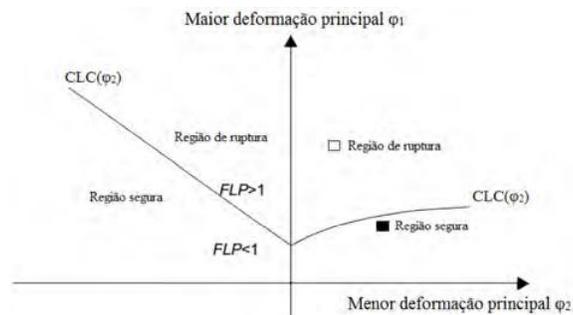


Figura 15. Valores do FLP representado na CLC, definindo-se as regiões seguras e as de ruptura de acordo com esse parâmetro [12].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de Tração e Anisotropia

Através dos ensaios de tração e anisotropia realizados assim como dos dados fornecidos pela Aperam (fabricante da chapa analisada) foi possível a obtenção das propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS 32205; apresentados na tabela 2.

Como resultado do ensaio de anisotropia tem-se os índices de anisotropia para os corpos de prova confeccionados a 0°, 45° e 90° da direção de laminação (r_0 , r_{45} e r_{90} respectivamente), além do índice de anisotropia planar (Δr) e do coeficiente de anisotropia normal (R_{med}).

Tabela 2. Propriedades mecânica do AID UNS 32205. Fonte: Autores.

Módulo de elasticidade (GPa): 200,00	Alongamento (%): 0,30	Índice de anisotropia 0°: 0,27
Densidade (g/cm ³): 7,8	Encruamento: 0,13	Índice de anisotropia 45°: 1,16
Tensão de escoamento (MPa): 542,00	Coefficiente de resistência: 1032,00	Índice de anisotropia 90°: 0,59
Limite de resistência (MPa): 830,00	Coefficiente de anisotropia planar: -0,73	Coefficiente de anisotropia normal: 0,8

Conhecendo-se as propriedades mecânicas do AID UNS 32205, foi possível construir a sua CLC (exposta na figura 4); calculando-se o ϵ_{10} (%) pela equação 8 [11].

$$\epsilon_{10} (\%) = (23,3 + 14,13 \cdot 1,2) \cdot 0,13/0,21 = 24,9 \quad (8)$$

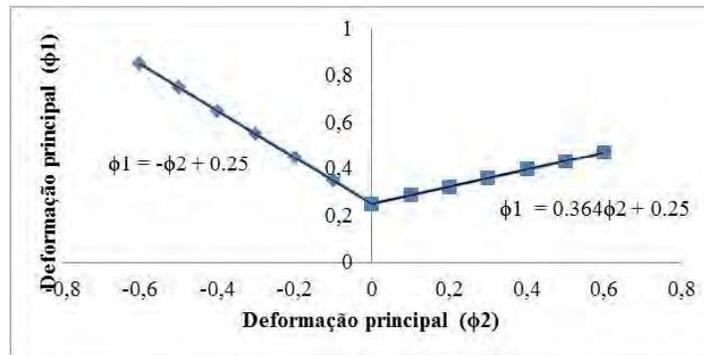


Figura 16. Curva Limite de Conformação encontrada para o AID UNS 3220. Fonte: Autores.

As propriedades expostas na tabela 2 e a CLC construída foram utilizadas para caracterização do AID UNS 32205 no *Simufact.forming12.0*[®]. Os resultados da simulação numérica do ensaio Swift deste aço estão apresentados na figura 5. Para cada relação de estampagem (β) estão expostos: o copo obtido aplicando-se a máxima FPC que não implique fratura (peça sadia, existente somente quando a β é menor que o $\beta_{máx}$) e o copo com a mínima FPC que acarrete falha do mesmo.

Os resultados são expressos em termo da FLP para os pontos da malha de elementos finitos gerada sobre a geratriz. Utiliza-se para uma melhor interpretação dos dados, uma escala de cor que varia de azul, FLP igual a zero, até vermelho, correspondente a uma FLP igual a um (indicando região de falha por ruptura). Na figura 5 está indicado, para cada caso, o valor da FLP máxima ($FLP_{máx}$) apresentada após a simulação.

As indicações das simulações para os locais de fratura dos copos que atingiram FLP igual a um encontram-se dentro do esperado, de acordo com o estado de deformação já conhecido atuantes em um corpo submetido ao embutimento.

O gráfico da figura 6 reflete os resultados obtidos através de diversas simulações numéricas considerando-se diferentes FPC para β variando de 1,80 a 2,40. Os pontos vermelhos indicam que naquela simulação a FLP atingiu o valor igual a um, ou seja, houve falha por ruptura da

peça; já os pontos azuis indicam a obtenção de peças sem fratura e os pontos verdes indicam a máxima FPC admissível para β menores que $\beta_{m\acute{a}x}$.

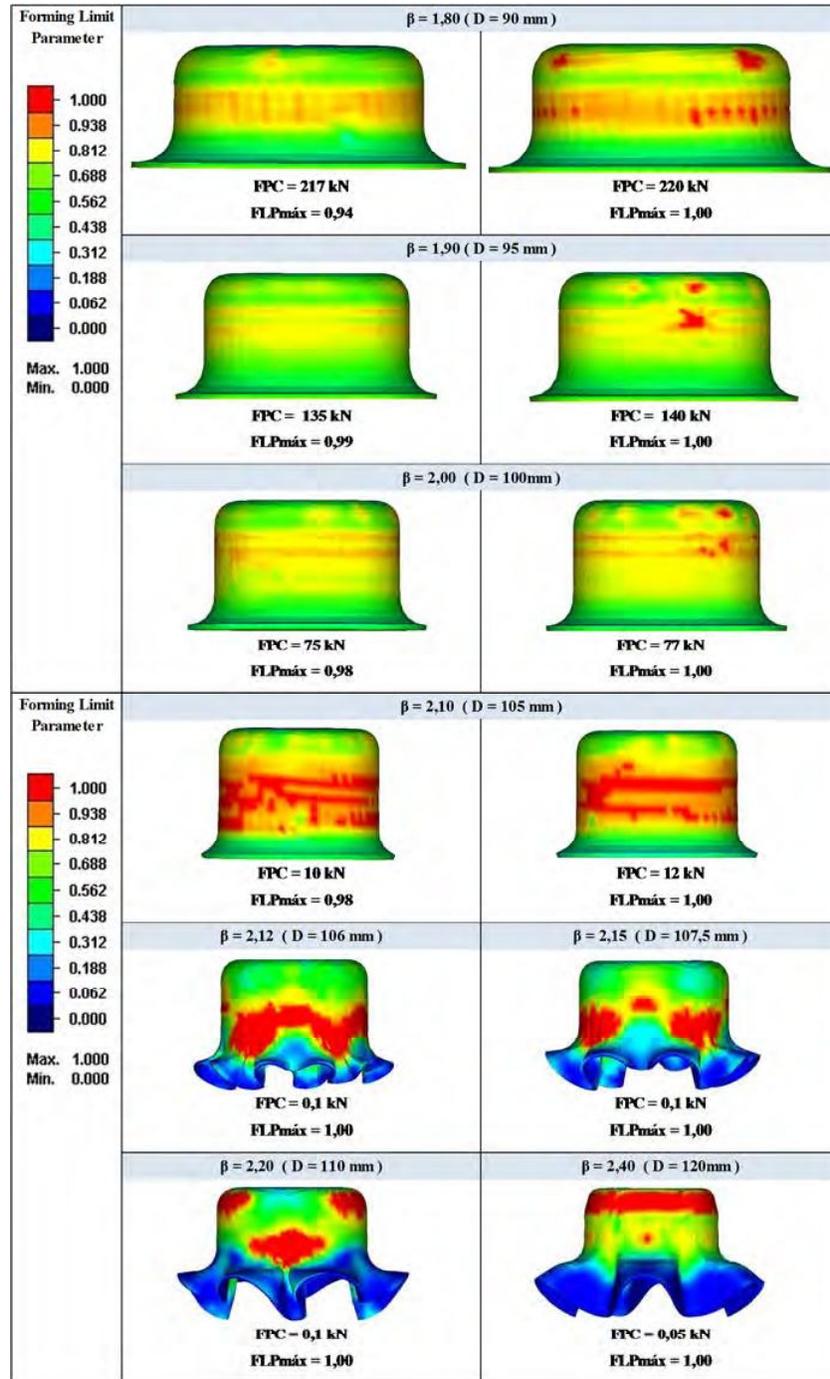


Figura 5. Resultados da simulação numérica do ensaio Swift para o AID UNS 32205. Fonte: Autores

Através dos dados obtidos do *Simufact.forming12.0*® pôde-se analisar o comportamento do AID UNS 32205 durante a sua estampagem profunda. Percebe-se que a partir do β igual a 2,10, independentemente da FPC empregado sempre resultará na falha da peça final (tanto por fratura quanto por enrugamento), indicando que este é o limite máximo de estampagem ($\beta_{m\acute{a}x}$) para este aço. Uma vez que o coeficiente de anisotropia do AID UNS 32205 simulado é pequeno (menor que 1,0), o $\beta_{m\acute{a}x}$ encontrado é coerente com o esperado, menor que 2,5.

Já para as relações de estampagem menores que 2,10; por meio das diversas simulações realizadas, foi possível determinar a linha de tendência polinomial do segundo grau para a $FPC_{m\acute{a}x}$ (equação 9) com R-quadrado igual a 0,9984.

$$FPC_{m\acute{a}x} = 425\beta^2 - 2338,5\beta + 3047,9 \quad (9)$$

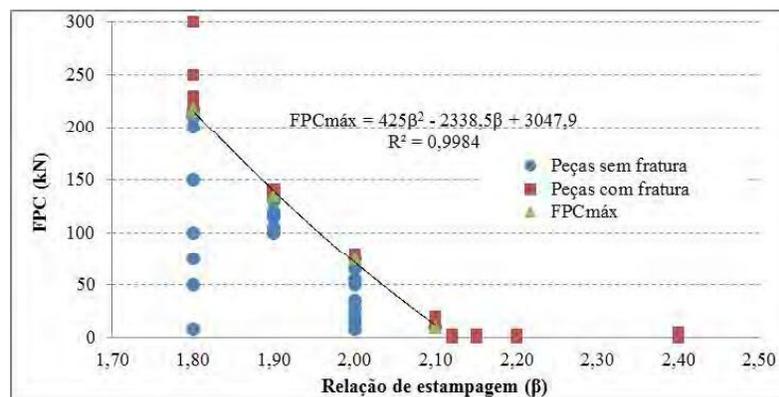


Figura 6. Gráfico FPC em função de diferentes β para o AID UNS 32205.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas do ensaio Swift do aço inoxidável duplex UNS 32205 com a finalidade de analisar a sua estampabilidade. Inicialmente foram feitos ensaios de tração e anisotropia como maneira de caracterização deste aço; com o objetivo de conferir maior confiabilidade aos dados de entrada no software *Simufact.forming12.0*®, principalmente a CLC teórica determinada pelo método NADDRG. Foi possível então chegar às seguintes conclusões:

De acordo com as diversas simulações de embutimento determinou-se que a relação máxima de estampagem admissível ($\beta_{m\acute{a}x}$) para uma chapa de AID UNS 32205 com espessura de 1,2 mm é igual a 2,10; uma vez que as simulações para relações de estampagem maiores ou iguais a 2,12 mostram claramente que o repuxo acarretará tanto em ruptura quanto em enrugamento da geratriz.

Para cada relação de estampagem (β) (de 1,80 até 2,10) determinou-se o limite máximo da força do prensa-chapas ($FPC_{m\acute{a}x}$) que não acarretasse a falha durante o embutimento do AID UNS 32205. Sendo possível ainda encontrar uma linha de tendência polinomial do segundo grau para tal relação de acordo com a equação 9.

Para a realização de um estudo completo da estampabilidade do AID UNS 32205 são desejáveis: A execução experimental do ensaio Swift para confirmação dos resultados aqui obtidos com a simulação numérica. Além da determinação da curva de FPC mínima para os valores de β entre 1,80 até 2,10; que garantam o não enrugamento da peça final.

Na percepção dos autores, a curva da figura 6 (FPC_{máx} versus β para o AID UNS 32205), obtidas por simulação numérica através do MEF, é um instrumento adequado na orientação do planejamento para a realização da etapa experimental para conferência de resultados. Uma vez que aumenta a probabilidade de redução do número de experimentos necessários assim como a previsão da peça final e dos possíveis modos de falha.

5. REFERÊNCIAS

¹SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, **2006**. 646p.

²Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. International Molybdenum Association, **2009**.

³SHENG, Z. Q.; JIRATHEARANAT, S.; ALTAN, T. Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, n. 5, p. 487-494, 2004.

⁴SCHAEFFER, LIRIO. Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 39-44, 2006.

⁵VERMA, Rahul K.; CHANDRA, Sanjay. An improved model for predicting limiting drawing ratio. Journal of materials processing technology, v. 172, n. 2, p. 218-224, **2006**.

⁶ALCANTARA, Claudio Moreira. Amostras para estudo 2205 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <juliana.sartori@fiab.org.br> em 23 set. 2014.

⁷LORA, Fabio Andre. Avaliação do processo de estampagem profunda de chapas de aço BH 180 e BH 220 utilizado na indústria automobilística. 2009.

⁸SCHAEFFER, Lirio. Conformação de Chapas Metálicas. Porto Alegre/RS: Imprensa Livre. 200 pg. **2004**.

⁹AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2011.

¹⁰AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E517-00: Standard Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, Pennsylvania, 2010.

¹¹SLOTA, J. SPISAK, E. Comparison of the forming-limit diagram (FLD) models for drawing quality (DQ) steel sheets. Metalurgija, v.44, n.4, p.249-253, **2005**.

V WORKSHOP DE PESQUISA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (PTI)
I SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA (SIINTEC)

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

¹²MSC SOFTWARE CORPORATION. Marc Volume A: Theory and User Information, 2013.