

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ESTAMPAGEM DE UMA EMBALAGEM METÁLICA DE DUAS PEÇAS*

Hesron Willian de Oliveira¹
Renato Silva Horta²
Luciano Pessanha Moreira³
Aline de Souza Silva⁴

Resumo

O presente trabalho propõe uma metodologia teórica-numérica a fim de contribuir com as etapas do projeto de ferramental para produção de embalagem metálica de duas peças. Nesta proposta, as propriedades mecânicas da folha cromada SAE 1008 T3, espessura 0,19 mm foram primeiramente avaliadas através do ensaio de tração uniaxial. A partir da geometria do ferramental, foi proposto um modelo de elementos finitos com $\frac{1}{4}$ de simetria do processo de estampagem profunda, a fim de considerar a anisotropia plástica inicial e os efeitos de atrito entre o ferramental e o blank. Ademais, as deformações limites que definem a Curva Limite de Conformação do material foram calculadas pelo modelo de localização de deformações plásticas utilizando os dados uniaxiais experimentais e a rugosidade média da superfície. A partir das previsões do modelo de elementos finitos, observa-se que o orelhamento formado no componente estampado ocorre em função da dependência da orientação angular, da tensão ou compressão de escoamento uniaxial ou da tensão de deformação. De fato, as variações radiais e na espessura dependem da anisotropia plástica apresentada pela tensão uniaxial na região do flange da embalagem de duas peças. Finalmente, as tensões limites previstas indicaram a viabilidade do processo.

Palavras-chave: Modelamento, Folhas Metálicas, Conformação, Embalagens.

NUMERICAL SIMULATION OF THE DEEP-DRAWING OF A TWO PIECE CAN

Abstract

The present contribution proposes a theoretical-numerical methodology aimed to help the tooling design steps to produce a two-piece metallic packaging. For this purpose, the mechanical properties of the 0.19 mm thick chromium coated SAE 1008 T3 steel foil were firstly evaluated by means of uniaxial tensile tests. From the tooling geometry, a $\frac{1}{4}$ symmetry finite element model of the deep-drawing process is proposed accounting for the initial plastic anisotropy and friction effects between the tools and the blank. Also, the limit strains which define the Forming Limit Curve of the material were calculated with a plastic flow localization model using the experimental uniaxial data and the average surface roughness. From the finite element model predictions, the ears formation in the stamped part is explained as a function of the angular orientation dependence of the uniaxial tension or compression yield and or flow stress. In fact, either the radial and through-thickness strains variations depend on the plastic anisotropy manifested by the uniaxial stress in the flange region of the deep-drawn two-piece can. Finally, the predicted limit strains indicated the feasibility of the process.

Keywords: Modelling, Sheet Metal Forming, Tinplate Steel, Steel Packaging.

¹ Engenheiro de Desenvolvimento, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, PGMEC, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ *Professor Associado, PPGEM, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil*

⁴ *Engenheiro Mecânico, Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A estampagem é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações pelas quais uma chapa plana adquire uma nova forma geométrica. Esse processo pode alcançar alta produtividade em conjunto com baixos custos de produção, baixo consumo de matérias-primas para fabricação de produtos semiacabados ou acabados. A concepção do ferramental de estampagem é usualmente realizada com bases em metodologia de tentativas e erros. Na última década, houve um grande aumento de estudos que visam desenvolver programas de simulação computacional de processos de conformação de chapas. Dentro deste contexto, têm destaque as simulações numéricas utilizando-se o método de elementos finitos, importante ferramenta na obtenção de processos otimizados. Fabricantes de componentes estampados, impulsionados pelo crescimento industrial, estão constantemente desenvolvendo estudos e melhorias nas áreas dos processos de fabricação. Para atender as novas exigências do mercado e entrega de produtos dentro dos prazos, os fabricantes buscam por processos industriais mais rápidos, flexíveis capazes de produzir grandes lotes de peças com alto nível de qualidade e custos reduzidos. A estampagem profunda, em particular, é um processo de conformação de chapas cujo campo de atuação inclui peças para os setores automobilístico, aeronáutico, produtos domésticos e embalagens de produtos químicos e alimentos, dentre outros. Hoje em dia ainda é comum se observar fabricantes empregarem o método de tentativas e erros para projetar e confeccionar as ferramentas de conformação. Esta metodologia resulta em uma calibração do processo de estampagem profunda, porém, resulta em alto índice de sucateamento e tempo adicional para ajustes e, portanto, traduz-se em aumentos nos custos e tempos de produção da peça desejada. Como alternativa, simulações numéricas de processos de conformação de chapas têm crescido rapidamente no meio industrial, permitindo análises dos comportamentos de peças submetidas a carregamentos complexos assim como prever a viabilidade de conformação de novos produtos com modificações de parâmetros geométricos e materiais. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia para concepção do ferramental de estampagem para produção de embalagens metálicas destinadas às indústrias alimentícia e química. Para tal, foi adotada uma embalagem cilíndrica de duas peças com diâmetro igual a 99 mm e altura de 52 mm conformada por estampagem profunda a partir de um esboço circular de folha cromada temperada T3 com espessura nominal de 0,19 mm.

2 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

O material investigado, é uma folha de flandres de aço SAE 1008 T3 com 0,19 mm de espessura nominal. Para fins de caracterização do comportamento mecânico, foram realizados ensaios de tração uniaxial no Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) empregando-se uma máquina universal de ensaios INSTRON 5585H equipada com célula de carga de 30 kN e sistema de vídeo-extensimetria. Os corpos de prova foram confeccionados em um centro de usinagem por comando numérico computadorizado ROMI Discovery 1250 conforme dimensões mostradas na Figura 1. De modo a avaliar a anisotropia plástica inicial, foram ensaiados um total de 9 corpos de prova, a saber, 3 na orientação paralela à direção de laminação (DL), 3 na orientação transversal (DT) e 3 a 45° com respeito à direção de laminação (DD). Todos os ensaios de tração uniaxial foram realizados a

uma velocidade constante da travessa móvel de 1 mm/min. O software INSTRON Série 25 T fornece os dados de força, alongamento, força de início de escoamento, força máxima, expoente de encruamento e coeficiente de anisotropia plástica.

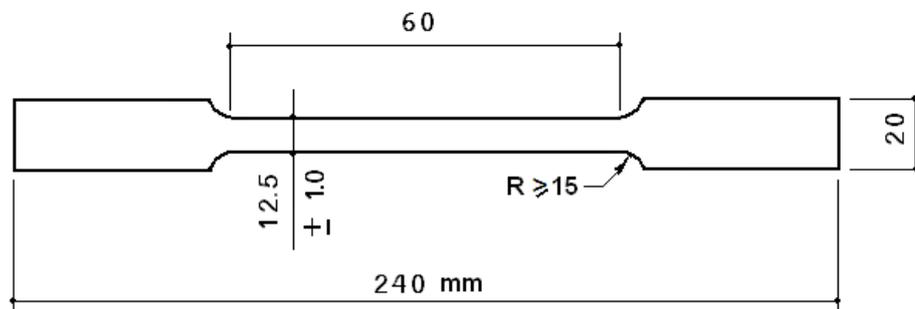


Figura 1.Corpo de prova para ensaio de tração uniaxial. Dimensões em mm.

Para descrever o comportamento plástico do material no modelo de elementos finitos, as curvas experimentais de tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira foram ajustadas a duas equações de encruamento. A primeira equação de Swift:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^N \quad (1)$$

na qual N é o expoente de encruamento, K é coeficiente de resistência (MPa) e ε_0 é a pré-deformação. A segunda equação de encruamento de Ludwik definida por:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\varepsilon^p)^N \quad (2)$$

na qual σ_0 é o limite de escoamento em tração uniaxial. Os parâmetros das equações (1) e (2) foram determinados por meio de ajuste não-linear disponível no programa comercial Origin.

3 MODELAMENTO

O ferramental de estampagem é composto por um punção, um contrapunção e dois prensa-chapas, um inferior e outro superior. O desenho esquemático do ferramental é apresentado na Figura 2. Na estampagem profunda da embalagem de duas peças, os prensa-chapas fazem primeiramente contato com o esboço metálico. Em seguida, ambos os prensa-chapas se movem para baixo, trazendo o esboço contra o punção e permitindo o processo de estampagem. Por fim, ao final do curso dos prensa-chapas, o contrapunção desce realizando a estampagem do fundo da embalagem. Foi realizada a descrição geométrica do ferramental de estampagem em modelos geométricos 3D a partir de desenhos 2D em CAD (Computer Aided Design) fornecidos pela CSN. As geometrias dos prensa-chapas, do punção e do contrapunção foram definidas no programa de elementos finitos ABAQUS/CAE. O esboço metálico possui raio inicial igual a 90,48 mm. Graças às simetrias axial da embalagem metálica e ortotrópica do material do esboço, foi modelado apenas um quarto das geometrias e apenas as superfícies de interesse, para fins de redução do tempo computacional.

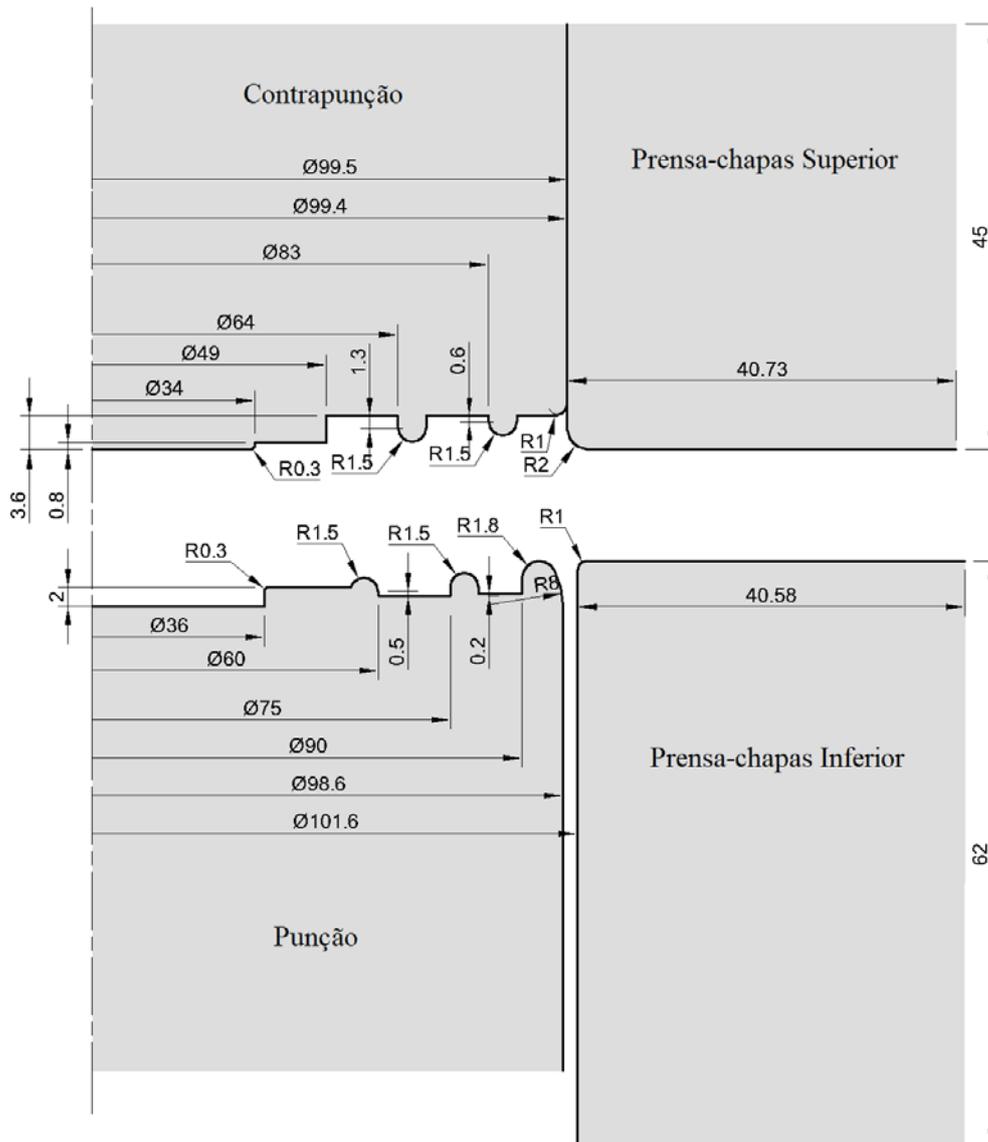


Figura 2.Conjunto do ferramental da estampagem profunda. Dimensões em mm.

Durante a estampagem, ocorre um aumento na espessura do esboço na região do flange conforme este entra na região da cavidade da matriz, diminuindo seu diâmetro. Ignorar este efeito pode levar ao agarramento excessivo do esboço pelos prensa-chapas, porém um aperto insuficiente pode também levar a defeitos de enrugamento. Assim, usualmente se faz um controle da força do punção, porém neste trabalho propôs-se um controle do deslocamento dos prensa-chapas. Para tal, foi estabelecido que o prensa-chapas inferior se move um pouco mais rápido que o superior, aumentando gradativamente a distância entre os prensa-chapas. Essa distância crescente em função do tempo computacional entre os prensa-chapas foi obtida a partir da variação da espessura do esboço determinada em simulações preliminares, que se apresenta aproximadamente linear, conforme mostrado no gráfico da Figura 3, aproximada pela seguinte equação:

$$g_i = 0,25(1 + t) \quad (3)$$

Na qual g_i é a separação crescente entre os prensa-chapas superior e inferior em milímetros e t é tempo computacional em segundos.

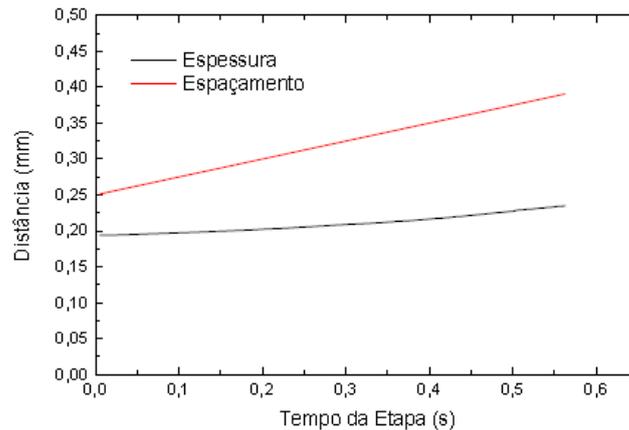


Figura 3. Curva do espaçamento entre os prensa-chapas durante o processo de estampagem.

O ferramental foi definido por elementos rígidos enquanto que o esboçometálico foi discretizado por elementos de casca adotando-se uma malha mapeada. A malha para o ferramental utilizou elementos R3D4 e para o esboço elementos de casca S4R, de acordo com a terminologia do programa ABAQUS. Nas regiões de cantos do punção e contrapunção, nas quais existem menores raios, foram feitos refinamentos na malha e, conseqüentemente, o mesmo foi feito nas regiões do esboço que entraram em contato com estes raios de adoçamento. A Figura 4 exibe os componentes com suas malhas e o resumo das malhas de elementos finitos do conjunto são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades das malhas.

Componente	Nº de nós	Nº de elementos	Tipo de elemento
Esboço	8.037	7.860	S4R
Punção	5.074	4.920	R3D4
Contrapunção	4.870	4.725	R3D4
Prensa-chapas inferior	2.744	2.640	R3D4
Prensa-chapas superior	2.544	2.444	R3D4

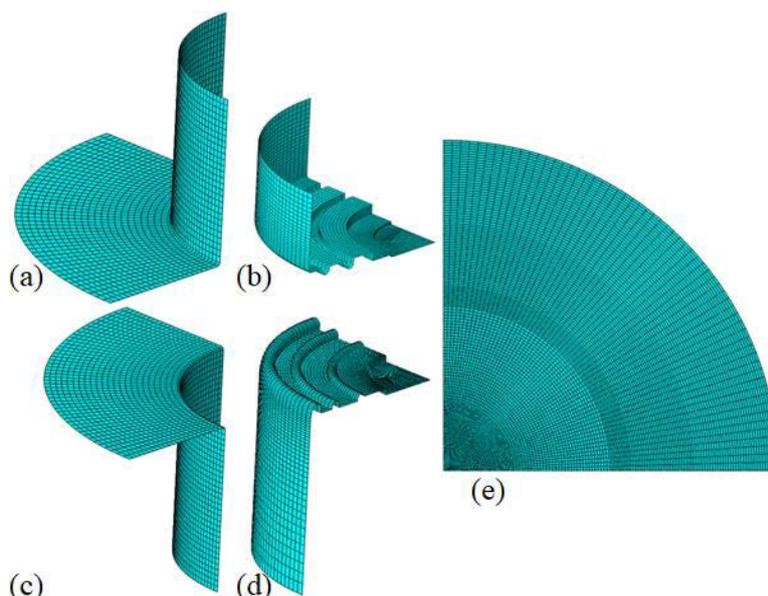


Figura 4. Malhas dos componentes: a) Prensa-chapas superior; b) Contrapunção; c) Prensa-

chapas inferior; d) Punção; e) Esboço.

Os efeitos de contato entre o esboço e o ferramental de estampagem foram descritos pela lei de atrito de Coulomb. Para descrever o comportamento mecânico da folha, assumiu-se a elasticidade linear isotrópica de Hooke definida em função dos valores do módulo de elasticidade longitudinal ($E = 207.000\text{MPa}$) e do coeficiente de Poisson ($\nu = 0,29$), em conjunto com a hipótese de encruamento isotrópico no contexto da teoria de escoamento plástico. A anisotropia plástica inicial da folha metálica foi descrita pelos critérios de escoamento de Hill quadrático [1] e Ferron[2], implementados em uma sub-rotina aberta ao usuário no programa ABAQUS/Explicit[3]. Com vistas a atender à velocidade de fabricação esperada de 100 peças por minuto, o processo de estampagem profunda foi simulado no tempo total de 0,655 segundos. Como o processo é dividido entre a estampagem do corpo da embalagem seguido pelo processo de conformação do fundo, foram criadas etapas individuais no programa ABAQUS/Explicit para cada uma dessas operações. Para manter ambas as velocidades do punção e contrapunção constantes e iguais, na primeira etapa o punção percorre o curso de 48 mm em 0,558 segundos, enquanto que o contrapunção percorre 3,61 mm em 0,042 segundos. Duas etapas adicionais foram criadas apenas para representação do contato e liberação entre os prensa-chapas e a folha metálica. Todas as etapas da simulação estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Etapas da simulação de estampagem

Etapas	Tempo da Etapa (s)
Aperto do esboço	0,005
Estampagem do corpo	0,558
Estampagem do fundo	0,042
Liberação do esboço	0,050
Total	0,655

As deformações limites que compõem a Curva Limite de Conformação (CLC) da folha metálica no espaço dos valores das menores e maiores deformações principais ($\varepsilon_2, \varepsilon_1$), foram calculadas empregando-se um modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczysnki (M-K) proposto por Freitas [4]. Nesse tipo de modelo, são considerados os efeitos de anisotropia plástica planar descrito pelo critério fenomenológico de Ferron[2] em conjunto com as equações constitutivas da teoria de escoamento plástico assumindo-se a hipótese de um encruamento isotrópico descrito pela Eq. (1). No modelo de localização do tipo M-K assume-se a existência de uma imperfeição geométrica inicial na forma de uma banda inclinada em relação a maior componente de tensão principal no plano da chapa, conforme esquema na Figura 5. Tal imperfeição geométrica é definida pela razão entre as espessuras das zonas homogênea e defeituosa representadas nesta figura pelos índices a e b , respectivamente. Neste trabalho, o valor inicial da imperfeição geométrica foi calculado a partir da rugosidade média inicial ($R_a = 0,61 \times 10^{-3}$ mm) medida na orientação transversal em relação a direção de laminação, a saber:

$$f_0 = \frac{h_0^a - 2R_a}{h_0^a} \quad (4)$$

sendo h_0^a (mm) a espessura inicial da folha metálica medida na direção transversal [4].

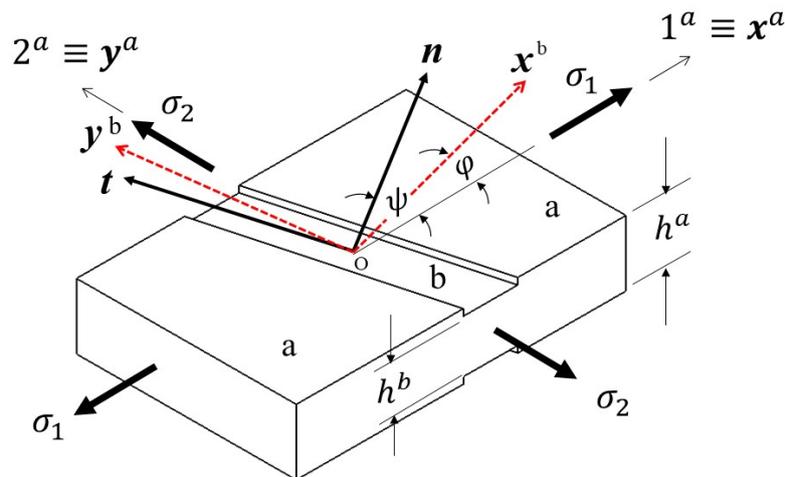


Figura 5. Esquema do modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczysnski. Adaptado de Freitas [4].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de tração uniaxial forneceram os valores médios das propriedades mecânicas da folha metálica em função da orientação angular em relação da direção de laminação. Estes resultados estão listados na Tabela 3, na qual σ_e é o limite de escoamento determinado a 0,2% de deformação plástica, ε_u é a deformação uniforme, ε_t é a deformação total, σ_u o limite de resistência, N é o expoente de encruamento, R é o coeficiente de anisotropia plástica de Lankford, \bar{R} é o coeficiente de anisotropia plástica normal e ΔR é a medida de anisotropia plástica planar. Os valores em itálico representam o desvio padrão calculado a partir de três ensaios. É possível observar primeiro menor valor do limite de escoamento em tração uniaxial na orientação a 45° em concordância com o maior valor do coeficiente de anisotropia plástica nessa orientação angular. Estes valores, em conjunto com o valor de anisotropia planar, indicam que a folha metálica apresentará na estampagem de copo cilíndrico orelhamento a 45° com vales nas orientações angulares que apresentam os valores mínimos de anisotropia plástica, a saber, as orientações paralela e transversal a direção de laminação.

Tabela 3. Propriedades mecânicas da folha metálica.

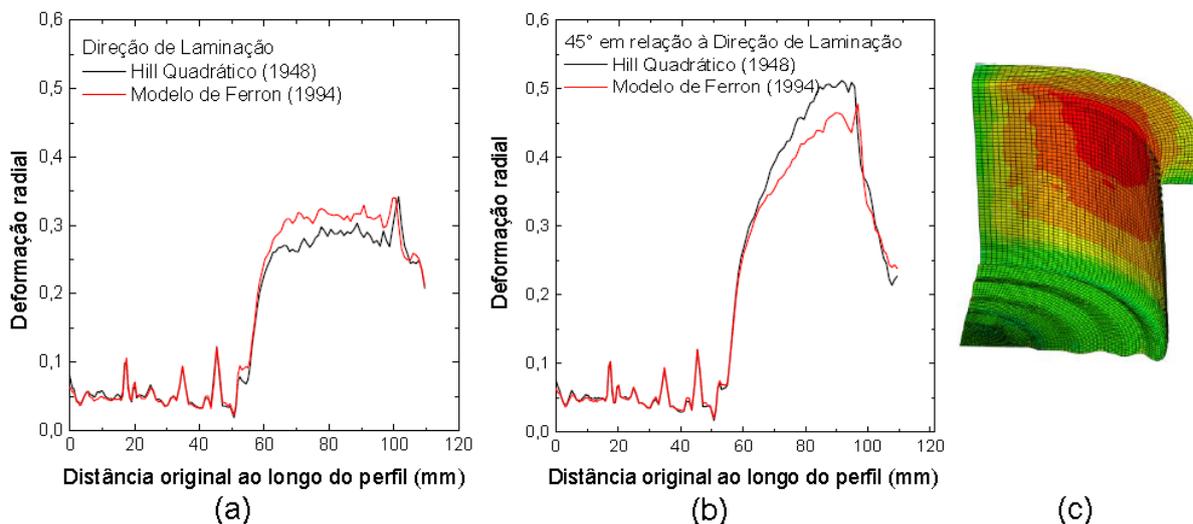
α (graus)	σ_e (MPa)	ε_u (%)	ε_t (%)	σ_u (MPa)	N	R	ΔR	\bar{R}
0	272 <i>0,67</i>	23,38 <i>0,28</i>	29,76 <i>0,36</i>	368 <i>1,33</i>	0,17 <i>0,00</i>	0,99 <i>0,05</i>		
45	263 <i>0,16</i>	25,83 <i>0,42</i>	36,66 <i>1,22</i>	355 <i>0,17</i>	0,18 <i>0,00</i>	1,41 <i>0,00</i>	-0,43	1,20
90	262 <i>2,98</i>	24,25 <i>0,52</i>	32,01 <i>1,50</i>	366 <i>0,67</i>	0,18 <i>0,00</i>	0,98 <i>0,04</i>		

Os parâmetros das equações de encruamento de Ludwik e Swift estão listados na Tabela 3, na qual é possível observar que esta última equação forneceu um melhor ajuste para todas as orientações angulares ($R^2 \sim 1$) e, portanto, foi escolhida para descrever o comportamento plástico da folha metálica nas simulações numéricas por elementos finitos do processo de estampagem de uma embalagem de duas peças.

Tabela 3. Parâmetros de encruamento determinados a partir dos resultados de tração uniaxial.

α (graus)	Ludwik				Swift			
	K (MPa)	N	σ_0 (MPa)	R^2	K (MPa)	N	ϵ_0	R^2
0	464,37	0,5989	272,18	0,9987	657,59	0,2652	0,0402	0,9999
	2,69	0,0048	0,62	0,0001	3,17	0,0009	0,0002	-
45	454,62	0,6104	262,61	0,9991	650,58	0,2916	0,0506	0,9998
	3,34	0,0040	0,07	0,0001	2,01	0,0027	0,0007	-
90	471,02	0,5834	261,88	0,9989	662,91	0,2757	0,0404	0,9999
	2,22	0,0132	3,07	0,0002	3,50	0,0047	0,0019	-

As previsões numéricas da distribuição de deformação radial na embalagem estão apresentadas na Figura 6 para as orientações angulares paralela (0°) e diagonal (45°) com respeito a direção de laminação. Estas distribuições estão representadas em função da distância original ao longo do perfil do centro a borda da peça estampada. Esta escolha é justificada uma vez que os valores do coeficiente de Lankford R nas orientações paralela (0°) e transversal (90°) são muito próximos, conforme Tabela 3. As deformações radiais na orientação paralela (e transversal) são inferiores em comparação as deformações radiais obtidas na orientação a 45° (diagonal) com respeito a direção de laminação, como pode ser visto na Figura 6 próximo as regiões da parede e flange, entre as distâncias 90 e 110 mm. Estes efeitos são atribuídos a evolução angular dos valores do coeficiente de anisotropia plástica R em tração ou melhor a evolução angular do limite de escoamento no estado de tração/compressão uniaxial $\sigma(\alpha)$ na direção circunferencial na borda do flange e cisalhamento puro na região do flange, ou seja, valores máximos de R (ou valores mínimos de limite e ou tensão de escoamento σ) resultam em maiores (ou menores) deformações radiais no flange do estampo [3],[5]. Deste modo, torna-se possível explicar as diferenças entre as previsões obtidas a partir dos critérios de escoamento em função da forma da superfície de escoamento entre os estados de tensão de interesse na estampagem, a saber, expansão biaxial simétrica no fundo, deformação plana na parede, cisalhamento puro no flange e compressão na borda.

**Figura 6.** Deformação radial ao longo do perfil do modelo da embalagem mostrado em detalhe (c): direção de laminação (a) e a 45° em relação a direção de laminação (b).

A Figura 7 apresenta o traçado das superfícies de escoamento a 0° e 45° com respeito à direção de laminação junto com os valores médios do limite de escoamento em tração uniaxial normalizado pelo limite de escoamento uniaxial na direção de laminação. A superfície de escoamento do critério de plasticidade de Hill quadrático [1] na orientação a 45° fornece menores valores de tensões por toda região de interesse do processo de estampagem profunda da embalagem de duas peças e, portanto, prevê maiores valores de deformações radiais nas regiões do estampo nesta orientação angular. De acordo com os valores do coeficiente de anisotropia plástica da folha metálica, listados na Tabela 3, a embalagem deverá apresentar orelhamento com picos a 45° e vales a 0° e 90°, respectivamente. Os vales (e picos) são formados em razão das maiores (e menores) deformações radiais na região do flange.

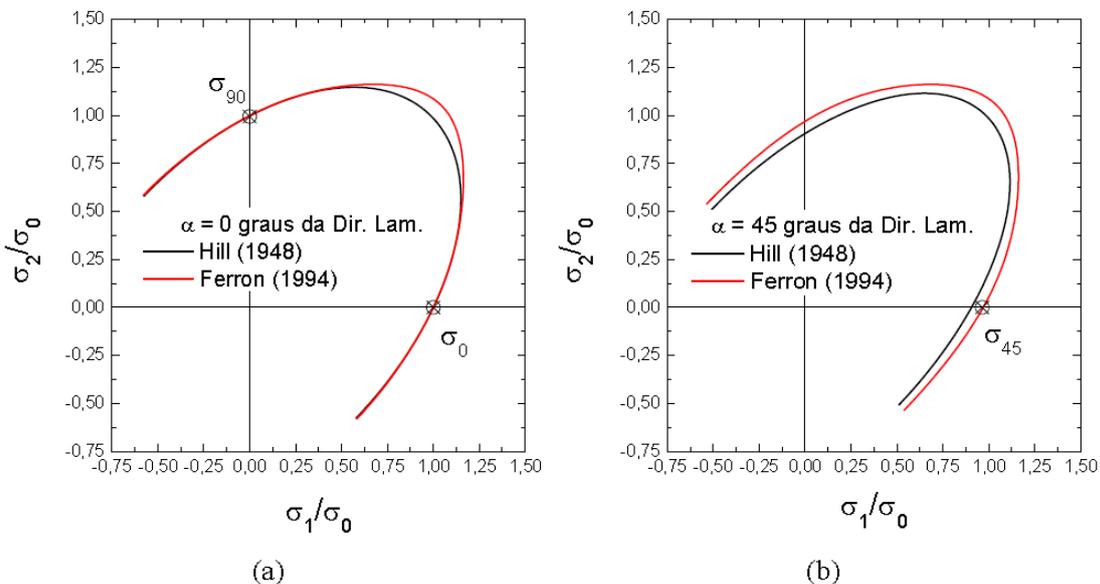


Figura 7. Superfícies de escoamentos representadas no espaço de tensões principais normalizadas: (a) orientação paralela (0°) e (b) orientação diagonal (45°) em relação à direção de laminação.

A Figura 8(c) apresenta as previsões do perfil do flange determinado para os critérios de Hill quadrático [1] e Ferron [2], Figuras 8(a) e 8(b), respectivamente. Nesta representação, o perfil do flange está normalizado pela distância radial na direção de laminação. Primeiramente, é possível analisar a formação de orelhamento no flange da embalagem na orientação próximo a 45° em concordância com a anisotropia plástica experimental da folha metálica, observada para ambas as razões de anisotropia plástica deformação e limite de escoamento em tração uniaxial, especificamente, $R_{45} > R_0 > R_{90}$ ou considerando-se os desvios padrão, $\sigma_{45} < \sigma_{90} < \sigma_0$. Em segundo lugar, menores valores das deformações radiais irão resultar na formação de vales nas orientações angulares paralela (0°) e transversal (90°) a direção de laminação. Por outro lado, os maiores níveis de deformações radiais obtidos na orientação diagonal (45°) em relação a direção de laminação resultam na formação de orelhas (picos).

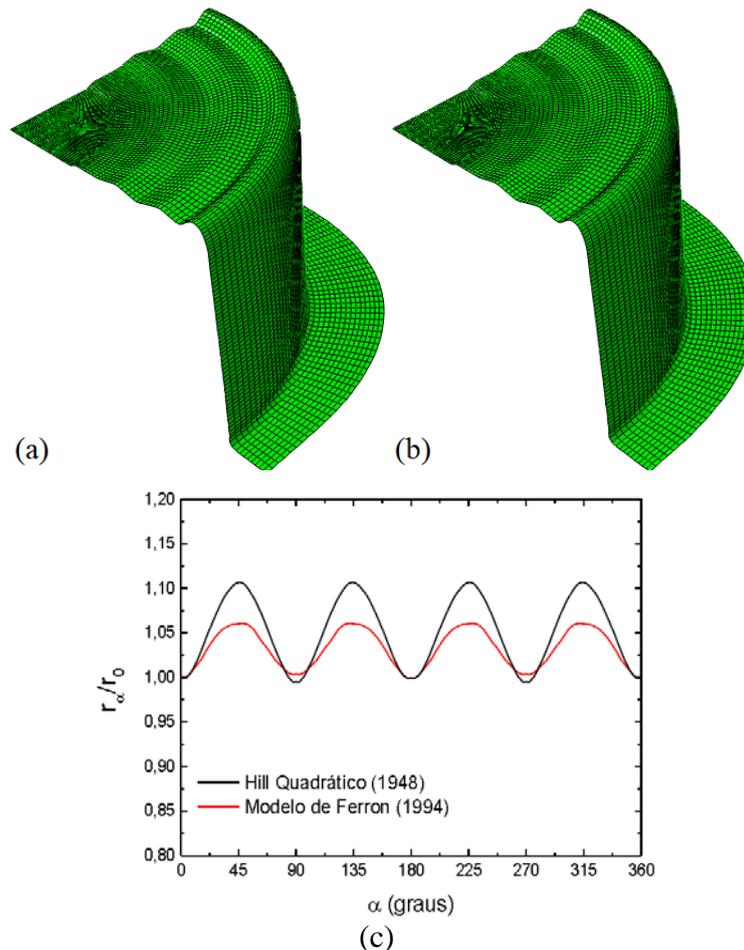


Figura 8. Previsões da geometria da embalagem metálica de duas peças obtidas a partir dos critérios (a) Hill quadrático [1] e (b) Ferron[2] e (c) variação angular do perfil normalizado do flange.

As previsões das deformações limites da folha metálica determinadas pelo modelo de localização do tipo Marciniak- Kuczysnski(M-K) com o critério de Ferron[2] estão apresentadas na Figura 9. Para fins de comparação, os valores das deformações principais previstas pelo modelo de elemento finitos da estampagem da embalagem de duas peças foram acrescentados na forma de par de pontos, os quais, por sua vez, são representativos das principais regiões da embalagem cilíndrica: fundo, raio do punção, parede, raio da matriz e flange. Este tipo de representação constitui uma ferramenta denominada Diagrama Limite de Conformação (DLC) que possibilita prever condições de risco de fratura precedida por instabilidade plástica na forma de estricção localizada, indicando assim as regiões críticas em dado estampo. Com exceção das deformações no flange, submetido a um estado de tensão por cisalhamento definido por componentes radial trativa e circunferencial compressiva, para o qual as previsões de qualquer modelo de localização M-K não se aplicariam, as comparações entre a CLC teórica e as previsões das deformações nas demais regiões da embalagem indicam a viabilidade da conformação com o ferramental e material propostos. Com a crescente demanda por redução de peso das embalagens, a metodologia teórico-numérica desenvolvida no presente trabalho pode ser aplicada nos estágios iniciais de projeto de ferramental de conformação mecânica carecendo, entretanto, validar experimentalmente as previsões com medidas de deformações e geometria do estampo. Com bases neste trabalho, os autores estão desenvolvendo ferramental para produção em escala piloto de

embalagens metálicas de duas peças e esperam apresentar os resultados de validação em breve.

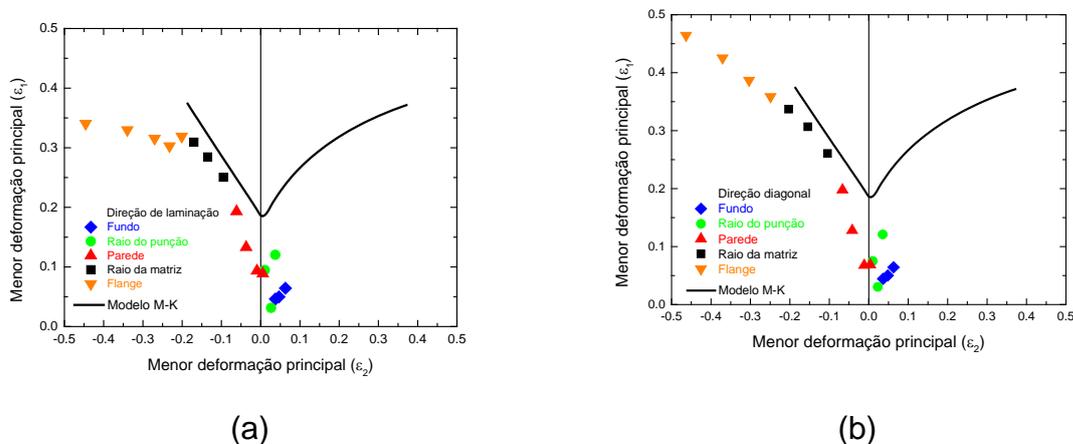


Figura 9. Previsões das deformações limites em uma embalagem de duas peças de folha metálica: direção de laminação (a) e a 45° em relação a direção de laminação (b).

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia teórico-numérica para auxiliar o projeto do ferramental do processo de estampagem de uma embalagem cilíndrica de duas peças a partir de uma folha metálica com espessura nominal igual a 0,19 mm. A partir dos valores das propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração uniaxial realizados em três orientações angulares com relação a direção da laminação e medidas de rugosidade inicial da folha metálicas foram propostos dois tipos de modelos. No primeiro modelo, o processo de estampagem profunda foi simulado pelo método de elementos finitos considerando-se os efeitos de anisotropia plástica, encruamento e atrito ferramental-esboço para conformar a embalagem duas etapas, a saber, corpo e fundo. No segundo modelo, foram considerados os efeitos das propriedades mecânicas e rugosidade inicial da folha metálicas para obter as previsões teóricas das deformações limites da Curva Limite de Conformação (CLC). Com bases nas previsões referentes ao processo de estampagem profunda de uma embalagem metálica de duas peças, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- (1) os efeitos de anisotropia plástica planar devem ser considerados por meio de critérios de plasticidade que descrevam corretamente as variações angulares do limite e ou tensão de escoamento no plano da chapa, possibilitando a previsão não somente da formação de orelhas como também da amplitude;
- (2) como consequência, foi demonstrado que as deformações radiais no estampo ou de forma equivalente as deformações na espessura, índice de regiões afinamento, dependem da anisotropia plástica e, em geral, as folhas metálicas apresentam alguma variação de propriedades mecânicas que pode resultar em desperdício de material ou até mesmo sucateamento devido as orelhas, enrugamento e afinamento excessivo;
- (3) o procedimento proposto para considerar a variação de espessura do flange por meio da separação dos prensa-chapas inferior e superior mostrou-se eficaz indicando uma forma de controle do processo real de conformação por estampagem profunda;

(4) as previsões das deformações limites determinadas por um modelo de localização podem ser muito úteis, sobretudo no caso de folhas metálicas para as quais a determinação experimental da CLC além de custosa é difícil de executar com sucesso;

(5) as previsões deformações principais das regiões representativas da embalagem indicaram a viabilidade do processo por meio do Diagrama Limite de Conformação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pela cessão de amostras de aço, confecção de corpos de prova e realização de ensaios mecânicos. Luciano Pessanha Moreira agradece ao CNPq pelo fomento por meio da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 305194/2015-1) e Renato Silva Horta a CAPES pela Bolsa de Mestrado no âmbito do Programa de Demanda Social.

REFERÊNCIAS

- 1 Hill, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Academy Society of London. 1948; A193: 281–297.
- 2 Ferron, G., Makkouk, R. and Morreale, J. A parametric description of orthotropic plasticity in metal sheets. Int. J. Plasticity. 1994; 10: 431-449.
- 3 Moreira, L.P., Ferron, G. Finite element implementation of an orthotropic plasticity model for sheet metal forming simulations. Latin American Journal of Solids and Structures. 2007; 4: 149-176.
- 4 Freitas, M.C.S., Moreira, L.P. and Velloso, R. G. Experimental analysis and theoretical predictions of the limit strains of a hot-dip galvanized interstitial-free steel sheet, Materials Research, 2013; 16: 351-366, <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000015>.
- 5 Moreira, L. P., Ferron, G. and Ferran, G. Experimental and numerical analysis of the cup drawing test for orthotropic metal sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2000;108: 78-86, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00660-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00660-9).