

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE EXPANSÃO POR PINÇAS DE FOLHAS METÁLICAS¹

*Eric Jeronimo de Oliveira Alvarez*²

*Luciano Pessanha Moreira*³

*Paulo Roberto Campissi de Souza*⁴

Resumo

O produto resultante do processo de expansão por pinças de folhas metálicas proporciona um maior apelo estético e uma melhor interação com o cliente, tornando as embalagens funcionais e abrangentes aos mais diversificados nichos de mercado, modificando os conceitos de ser apenas um recipiente de armazenamento. O estudo do comportamento mecânico de latas expandidas é fundamental para caracterizar a expansibilidade das folhas metálicas, onde se adota o conceito da Curva Limite de Conformação (CLC). A concepção da CLC foi realizada com o auxílio de um software de análise e correlação de imagens digitais. O diferencial da abordagem neste trabalho é a utilização de diversos raios, partindo de uma seção paralela, e por raios de 70 mm, 60 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm até raio de 5 mm. Os corpos de prova utilizados são canudos litografados e soldados. As simulações numéricas foram realizadas com um código comercial de elementos finitos comparando os resultados do comportamento de deformações e de previsões numéricas com as medidas experimentais obtidas por análise de imagens.

Palavras-chave: Folhas metálicas; Simulação numérica; Curva limite de conformação.

NUMERICAL SIMULATION OF THE STRETCH FORMING PROCESS FOR METAL SHEETS

Abstract

The product resulting from the expansion process by stretch of sheet metal allows for greater aesthetic appeal and better interaction with the client, making it functional and comprehensive packages to the most diverse niche markets, changing concepts of being just a storage container. The study mechanical behavior of expanded cans is fundamental to characterize the expansion of the sheet metal, wherein the concept of the Forming Limit Curve (FLC) is widely adopted. The definition of the FLC was performed with the aid of analysis software and digital image correlation. The differential approach in this work is the use of various tooling radii, starting from a parallel section, and from 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 and 5mm. The specimens used are lithographed and welded tubes. The numerical simulations were performed using a commercial finite element code by comparing the results of the behavior of deformation and numerical predictions with experimental measurements obtained by digital image analysis.

Key-words: Sheet metal; Numerical simulation; Forming limit curve.

¹ *Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

² *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense - UFF*

³ *D.Sc. Universidade Federal Fluminense- UFF*

⁴ *Engenheiro Metalúrgico, Coordenador de Projetos Especiais – CSN*

1 INTRODUÇÃO

As embalagens metálicas de forma geral estão sendo atacadas pelos sucedâneos nos últimos anos. A busca por soluções criativas e o empenho na redução de custo do material, em especial as folhas de flandres, são os principais fatores motivadores para o desenvolvimento deste trabalho. Se a embalagem antiga remete ao artesanato, a de nossos dias nasceu como irmã gêmea da indústria. Nessa transformação, mudou de personalidade e serventia. Qualidades antigas, como a resistência ao transporte e à umidade, continuam essenciais, mas obrigatoriamente suplementares por outras também importantes, como a identificação do fabricante do produto embalado e o poder de sedução exercido sobre os compradores.

A estampagem é um processo amplamente utilizado e produz uma grande diversidade de peças, como carrocerias de automóveis, utensílios de cozinha, embalagens metálicas, componentes mecânicos, entre outros. Nos ensaios de estampagem procura-se avaliar as condições de conformação que evitem defeitos como rugas, trincas de bordas como, por exemplo, no caso da estampagem de copos, estrição ou a ruptura do material. A Curva Limite de Conformação (CLC) é uma representação geométrica que separa o espaço do sucesso do espaço da falha nos processos de conformação de chapas. A CLC deve então reproduzir condições bem próximas da realidade. A razão do uso das curvas limites de conformação reside no fato de que nos processos de conformação de chapas, surgem estados de tensão que vão desde um estado de tensões de cisalhamento puro até de tensões normais biaxiais iguais e balanceadas, correspondendo respectivamente a estados de deformação desde a estampagem profunda até o estiramento puro.

Os processos de conformação mecânica de materiais metálicos exigem o conhecimento do comportamento do material durante seu processamento para que se obtenha sucesso para a forma ou peça desejada. Uma das dificuldades da determinação da CLC consiste nas diferentes variáveis (atrimento, forma da ferramenta de estampagem, espessura da chapa metálica, velocidade de embutimento, lei de encruamento, modelo de plasticidade etc.) que o processo de estampagem possui.

Este trabalho realiza a determinação experimental da CLC através das expansões por pinças com diferentes raios, realizadas em canudos de folhas de flandres soldados. A obtenção dos dados e análise foram obtidos com auxílio do software de análise de imagens Asame. As análises das deformações limites foram feitas na estrição em uma região simétrica a fratura, no caso, em regiões de contato das pinças com o corpo de prova e nas regiões entre pinças. As simulações numéricas serão realizadas com o programa de elementos finitos Abaqus onde o modelo proposto será implantado através de uma sub-rotina Fortran. Os resultados obtidos através das análises realizadas pelo Asame serão comparados com os resultados obtidos pela simulação numérica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais adotados para realização dos ensaios são Folhas de Flandres, produzidas na Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, via recozimento contínuo, com espessura de 0,18 mm que apresentam na Tabela 1 parâmetros de produção e composição química conforme Tabela 2. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas do material.

Tabela 1: Parâmetros de produção

Espessura (mm)	LTQ (mm)	LTF (% de redução)	LRC	LE (% de redução)
0,18	2,25	92	Sim	0,8-1,0

LTQ – Laminador de Tiras à Quente; LTF – Laminador de Tiras à Frio; LRC – Linha de Recozimento Contínuo; LE - Laminador de Encruamento.

Tabela 2: Composição química

Elemento (%)						
C	Mn	Si	P	S	Al	N
0.03-0,06	0.25-0.35	0.02 Máx.	0.02 Máx.	0.025 Máx.	0.02-0,06	0.006 Máx.

Tabela 3: Propriedades mecânicas

Espessura (mm)	Lim. Esc. (MPa)	Lim. Res. (MPa)	AL(%) Mínimo
0,18	435 +/- 50	460+/- 50	12

Os ensaios metalográficos foram realizados no Centro de Pesquisas da CSN. Os resultados obtidos mostram uma microestrutura composta por grãos ferríticos poligonais e cementita globular fina alinhada, com tamanho de grão de aproximadamente 12 ASTM, conforme Figura 1.

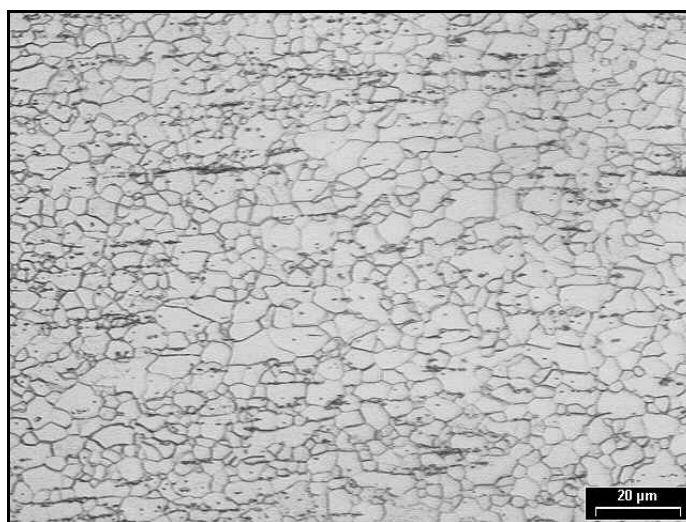


Figura 1 – Micrografia da folha de flandres.

2.1 Corpos de Prova

As Folhas de Flandres estão dispostas em formato de canudos soldados com diâmetro de 73 mm e altura de 186 mm e foram litografadas de forma quadriculada (2,5 x 2,5 mm), para que após a conformação sejam estudados os níveis de deformação do canudo. O canudo é introduzido na ferramenta de expansão, que é composta de 12 pinças seccionadas, que se abrem fazendo com que a lata seja

expandida na direção circunferencial até o diâmetro predeterminado. É importante notar que o canudo é livre nas extremidades e, ao ser expandido diametralmente, irá contrair-se longitudinalmente. Isto leva a deformações negativas longitudinais (ϵ_2) e positivas diametrais (ϵ_1), ou seja, como mostra a ilustração esquemática da deformação de um círculo localizado na superfície do canudo. A Figura 2 representa um desenho esquemático do processo.

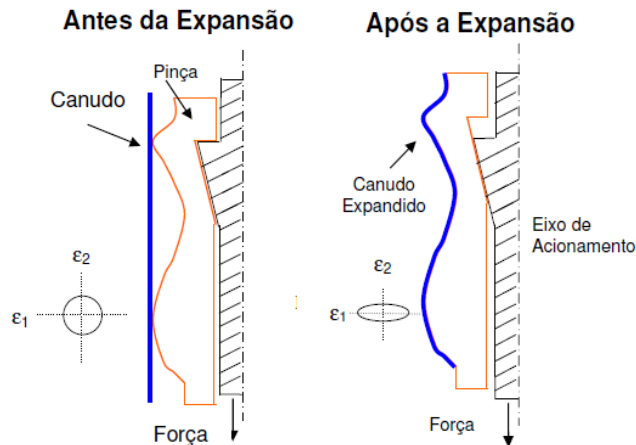


Figura 2 - Desenho esquemático do processo de expansão por pinças.

As ferramentas utilizadas para o processo de expansão por pinças foram usinadas na indústria Lucas Usinagem, em Diadema/SP. Foram produzidos quatro conjuntos de ferramentas, com perfis que visem atender as principais condições de deformação, conforme Figura 3:

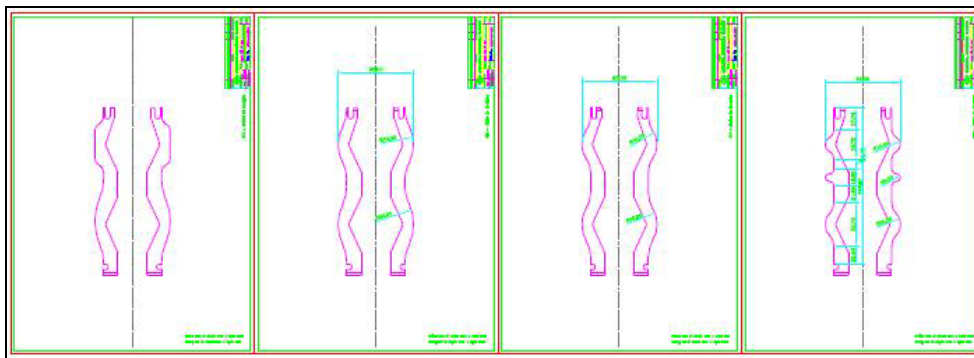


Figura 3 - Desenho técnico das ferramentas de expansão por pinças.

As ferramentas possuem alguns detalhes de construção, que são constantes para todas as ferramentas, como: diâmetro inicial, diâmetro final máximo, número de pinças 12, largura das pinças, rugosidade superficial de $0,15 \mu\text{m}$.

As expansões foram realizadas na máquina de expansão piloto do Centro de Inovações da CSN. Abaixo temos a Figura 4, que mostra a evolução das expansões em comparação ao canudo ou corpo de prova original.

Para este teste foi utilizado dois corpos de prova para cada ferramental (5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm e Paralelo) sendo os mesmos deformados até a fratura. A Figura 5 ilustra os ferramentais.



Figura 4 – Corpos de prova após a expansão por pinças nas diferentes ferramentas.

2.2 Curva Limite de Conformação (CLC)

A determinação dos limites de conformabilidade contribui para a redução de custos de predição do comportamento dos materiais utilizados e desempenho do processo mecânico estudado, uma vez que dispõe da rapidez e praticidade. Na busca de representar de uma maneira mais abrangente a estampabilidade de uma chapa Goodwin⁽¹⁾ e Keeler⁽²⁾ desenvolveram a Curva Limite Conformação (CLC). A técnica de medição da deformação localizada, descrita por Ghosh e Hecker,⁽³⁾ refere-se à forma de efetuar as medições das deformações sobre a chapa, previamente gravada com círculos, e conduzida até a fratura (Figura 5).

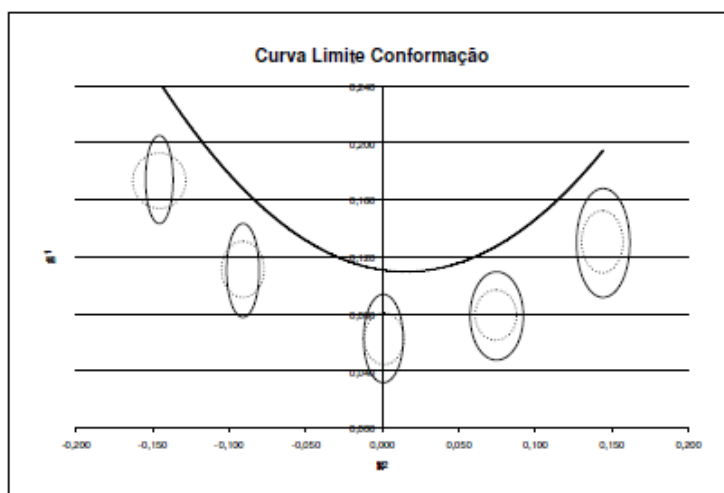


Figura 5 - Curva limite de conformação.

Existem diversos fatores que influenciam na obtenção da CLC, como expoente de encruamento (n), índice de sensibilidade a taxa de deformação (m), coeficiente de anisotropia (R), espessura e orientação do esboço, efeito geométrico, atrito, temperatura, inclusões, impurezas, composição química, trajetória de deformação e revestimentos.

2.2 Simulações Numéricas

As simulações numéricas foram feitas com o auxílio do programa comercial de elementos finitos Abaqus/Standard. Na Figura 6 está representado o modelo do processo de expansão por pinças, no qual é representado apenas a metade das pinças, devido a consideração inicial de simetria do canudo. O modelo se comporta

apenas com o movimento radial até um diâmetro pré-determinado para cada tipo de raio. O atrito considerado é do tipo Coulomb com valor igual a 0,1, devido ao bom polimento das pinças e da lubrificação interna do canudo devido ao envernizamento. As pinças foram modeladas como corpo rígido a partir dos desenhos em formato CAD. O canudo foi descrito por 1.110 elementos de casca com 4 nós em um ponto de integração. O comportamento da folha de flandres foi obtido a partir da curva experimental de tração uniaxial na direção de laminação e descrito por ajuste segundo a lei de encruamento de Swift por

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

onde $K = 491,36$ MPa, $\varepsilon_0 = 0,059$ e $n = 0,146$.

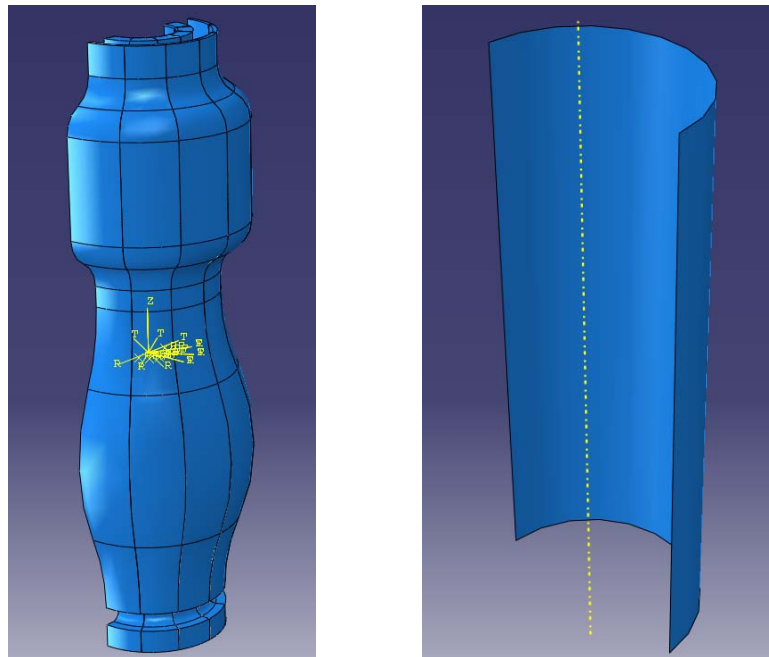


Figura 6 – Modelo de elementos finitos do processo de expansão por pinças.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelas análises das imagens dos corpos de prova após expansão pelo software Asame, medidas nos laboratórios da Universidade Federal Fluminense – UFF, conforme as figuras abaixo:

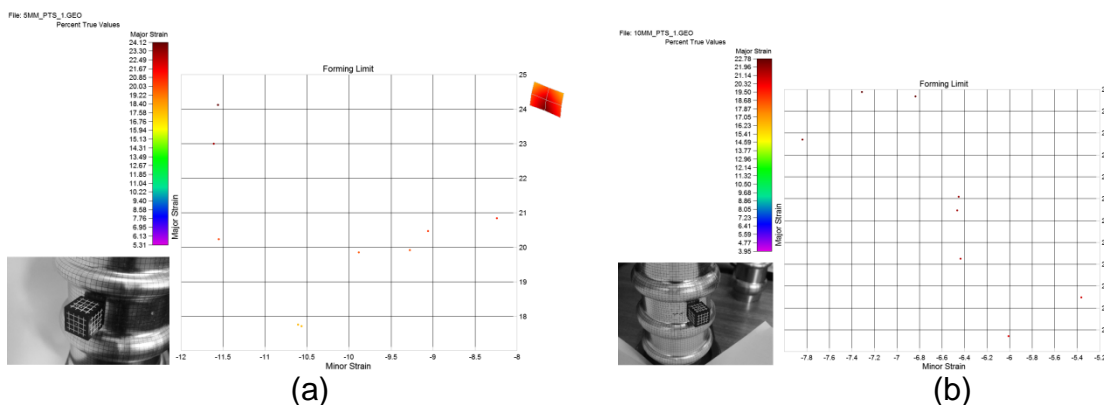


Figura 7 – Resultados obtidos para raio de 5 mm (a) e 10 mm (b).

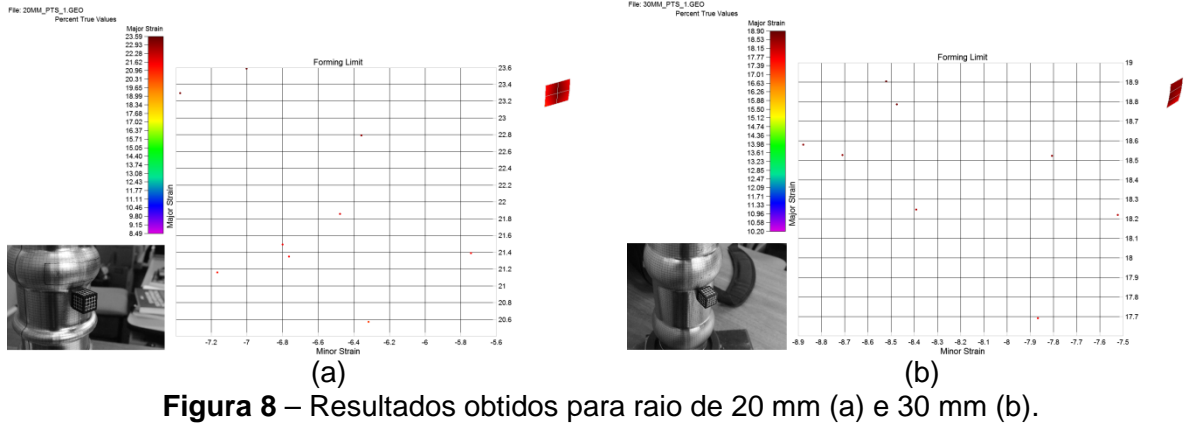


Figura 8 – Resultados obtidos para raio de 20 mm (a) e 30 mm (b).

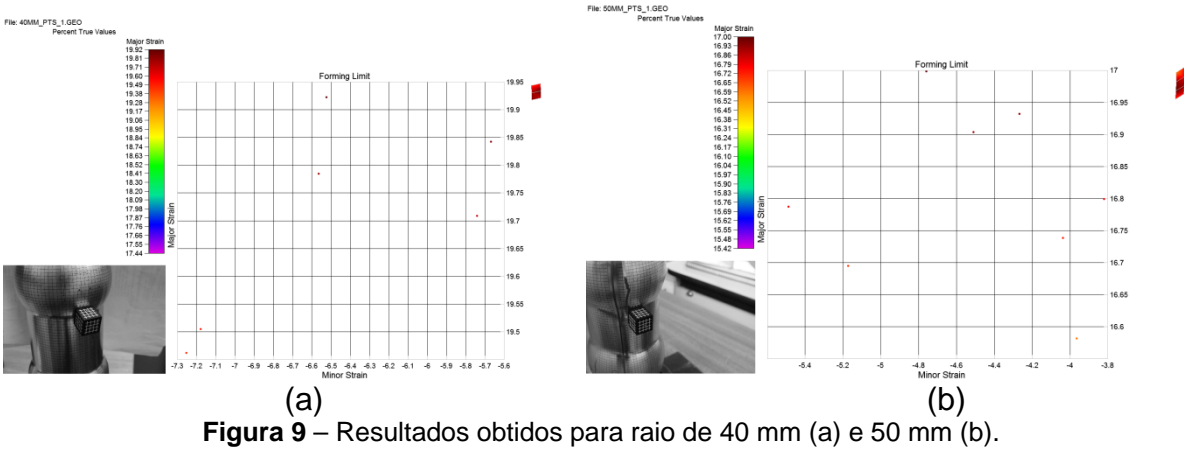


Figura 9 – Resultados obtidos para raio de 40 mm (a) e 50 mm (b).

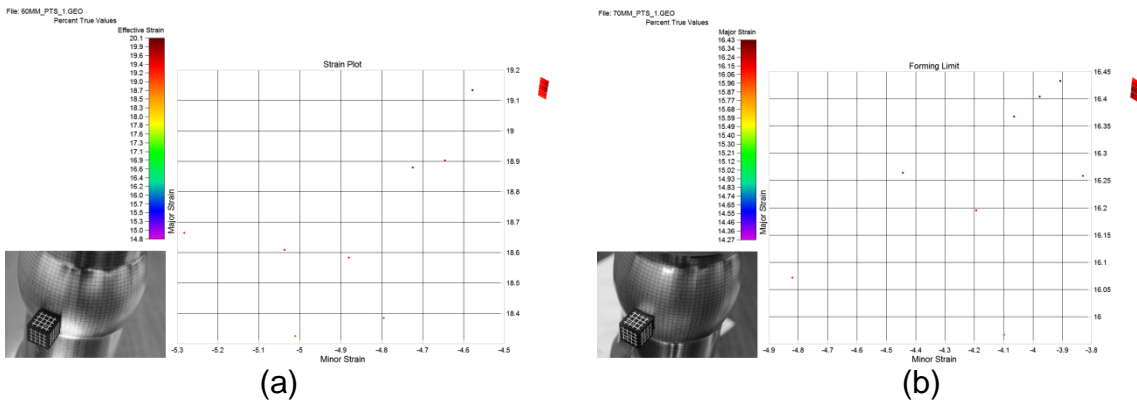


Figura 10 – Resultados obtidos para raio de 60 mm (a) e 70 mm (b).

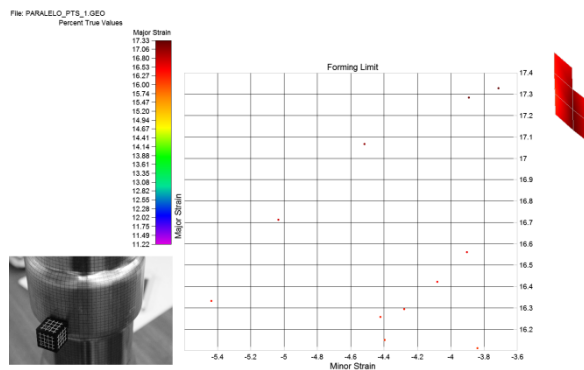


Figura 11 – Resultados obtidos para trecho paralelo.

As regiões entre pinças foram escolhidas para as análises, pois são apresentadas maiores níveis de deformação. As escolhas dos corpos de prova para serem analisados foram feitas através do que apresentasse aparência mais significativa de uma série de cinco amostras para cada raio.

Na Figura 12 está representando a união dos pontos dos diferentes tipos de raios, nota-se que com a redução no do raio os pontos se deslocam para a esquerda e para cima, ou seja, há um aumento em (e1) e redução em (e2).

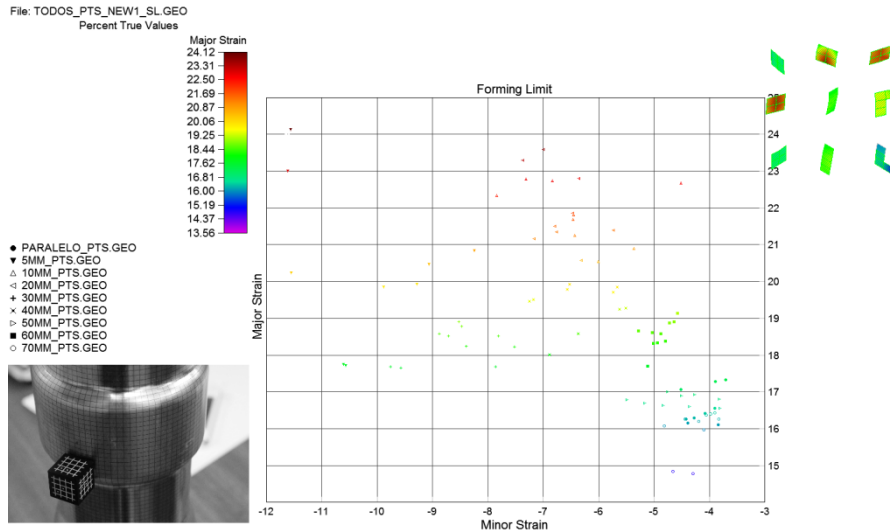


Figura 12 – Curva Limite de Conformação – união dos pontos de todos os raios.

Durante as análises detectou-se que para o trecho paralelo e os raios de 50 mm e 5 mm, inclinações ligeiramente afastadas do perfil da curva, isto se deve a diferentes níveis de contato ferramenta-canudo.

4 CONCLUSÕES

As medidas de deformação obtidas pelo Asame servirão como referência para as previsões obtidas após as simulações serem concluídas. O modelo proposto servirá como facilitador para elaboração de projetos de inovação em embalagens metálicas. Após a validação do modelo, poderemos apenas utilizar como variáveis a geometria do ferramental, o dimensional do canudo e os parâmetros do material, como: limite de escoamento, limite de resistência e os valores de R e n. Para o primeiro modelo não consideramos a influência da região da solda, assim, utilizamos apenas metade do ferramental e do canudo.

As regiões escolhidas para análise dos níveis de deformação dos diferentes raios foram as entre pinças, pois são as que apresentam maiores níveis de deformação, ressaltando também que, essas regiões sofrem uma grande influência devido as quinas das pinças, que geralmente são os locais que dão início a estricção e, por conseguinte a fratura. Esse caso é evidenciado com maior clareza na ferramenta que apresenta trecho paralelo, e também essa característica é visualizada no final longitudinal do trecho paralelo de cada pinça, devido ao fim abrupto da região de contato.

Os resultados obtidos pela simulação da primeira ferramenta, que contém o raio 70 mm e o trecho paralelo, apresentaram níveis de (e1) e (e2) maiores do que encontrados experimentalmente, que apresentam níveis de deformação em torno de 16%. A consideração importante para essa simulação foi a isotropia do material.

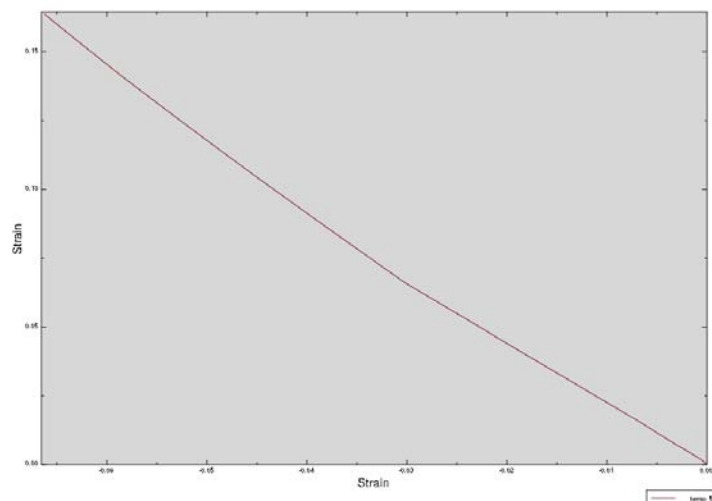


Figura 13 – Gráfico apresentando o comportamento de $(e_1) \times (e_2)$ durante a simulação do processo.

A prospecção deste modelo também nos levará a simular o comportamento do material da folha metálica sem a consideração inicial de simetria, ou seja, levando em conta a região de solda, pois esta região apresenta uma não-homogeneidade microestrutural, com isso tendo um comportamento mecânico um pouco diferente do restante do material.

As condições referentes a anisotropia plástica serão analisadas através dos critérios de von Mises e Hill quadrático ⁽⁴⁾, sendo considerada como anisotropia estacionária. A perspectiva desta consideração é nos levar a um melhor estudo ou uma melhor representação do comportamento do material durante o processo de expansão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CSN pelo fornecimento das folhas metálicas e dos laboratórios para preparação das amostras e realização de ensaios de caracterização mecânica e metalográfica do material, e a empresa Rimet que realizou a litografia e a soldagem dos corpos de prova. Luciano P. Moreira agradece a FAPERJ pelo apoio financeiro (Jovens Cientistas do Nosso Estado) e ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Goodwin, G.M., Application of the strain analysis to sheet metal forming in the press shop, *La Metallurgia Italiana*, Vol.8, 1968, p.767-72.
- 2 Keeler, S.P., Determination of the forming limits in automotive stamping, *Sheet Metal Industries*, Vol. 461, 1965, p. 683-691.
- 3 Ghosh, A. K. et Hecker, S. S., Failure in Thin Sheets Stretched Over Rigid Punches, *Metallurgical Transactions A*, 1975, Vol. 6A, p. 1065- 1074.
- 4 Hosford, W.F. , *The mechanics of crystals and textured polycrystals*. New York: Ed. Oxford University Press, 1993, p. 56-84.