

# DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA O AÇO INOXIDÁVEL 304

## Haroldo Béria Campos

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901, [beriacampos@uol.com.br](mailto:beriacampos@uol.com.br)

## Carmem Butuc

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

## José Joaquim Grácio

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

## João E. Rocha

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

## José Manuel Ferreira Duarte

Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade do Porto, 4099 Porto Codex, Portugal.

**Resumo.** Foi feita a predição teórica e a validação experimental da curva limite de estampagem (CLE) para o aço inox AISI 304 quando submetido à trajetória de deformação linear. Na predição teórica do diagrama foi usado o método de Marciniak - Kuczynski (M-K). No cálculo foi utilizado o critério de escoamento de Hill'48. Para o levantamento experimental da curva limite de estampagem foi utilizado: corpos de prova de tração não entalhados simulando uma trajetória de deformação de tração pura; corpos de prova de tração entalhados simulando trajetórias de deformação compreendidas entre tração pura e deformação plana e corpos de prova circular para obtenção de trajetórias representando expansão biaxial. Os corpos de prova circular foram submetidos à expansão biaxial através do teste Jovignot (bulge-test). Para a determinação dos valores de deformação a estricção foi utilizado o método número 5 de Zurich. Utilizando um fator de heterogeneidade de 0.955 foi obtido ótimo ajuste da curva limite de estampagem predita teoricamente com aquela obtida experimentalmente.

**Palavras-Chave:** curva limite de estampagem, método MK, aço inoxidável AISI 304.

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos tecnológicos de conformação dos metais por deformação plástica permitem a obtenção de peças mecânicas com taxas de produção elevadas e a utilização praticamente integral da matéria prima disponível. Esses processos ocupam, devido à quantidade de matéria prima tratada, um lugar de relevo no seio das indústrias de transformação.

O sucesso de uma determinada operação de conformação plástica depende de numerosos parâmetros interativos de natureza muito diversa (geometria pretendida, condições de operação, propriedades do material, etc.). Ainda que a influência de cada um destes parâmetros possa ser analisada separadamente, a sua síntese é particularmente difícil, devido à sua complexidade e à sua interatividade.

A capacidade de prever o sucesso de uma operação de conformação plástica, utilizando ou não recurso da simulação numérica, é de considerável interesse tecnológico. O resultado final de todo o processo de concepção depende, como já referido, de um número elevado de parâmetros. A simulação numérica com base no método dos elementos finitos é uma área complexa, que permite, atualmente, obter resultados de inquestionável interesse. A complexidade dos processos de

conformação plástica obriga a uma caracterização rigorosa e constante do comportamento mecânico e "formabilidade" das chapas metálicas utilizadas nestes processos<sup>(1)</sup>. Nos últimos anos, importantes desenvolvimentos têm sido conseguidos, baseados em novos modelos, em análises experimentais laboratoriais e industriais.

Para avaliação da "formabilidade", Diagramas Limite de Estampagem (DLE) têm sido extensamente utilizados na indústria de conformação de chapas, particularmente na automobilística. Os DLE permitem prever quais deformações poderão levar à falha do material para diferentes trajetórias de deformação, sendo uma importante ferramenta no projeto de matrizes e na otimização e correção de problemas na linha de produção<sup>(2)</sup>.

O conceito do DLE foi inicialmente desenvolvido por Keeler<sup>(3)</sup>. O método apresentado consiste em marcar uma chapa com uma rede (malha) de círculos que são posteriormente estampados até a falha do material. Dessa forma, os círculos assumem a forma de elipses e as deformações são obtidas através da medição de seus eixos maior e menor. Os círculos atingidos pela fratura são considerados "falhados", enquanto os outros são considerados "seguros". O DLE é traçado a partir da combinação de deformações que levam à falha.

A avaliação da "formabilidade" de chapas metálicas tem sido feita utilizando variadíssimos ensaios tais como o Erichsen, Swift, Nakazima, LDH (*Limit Dome Height*) e Fukui<sup>(1)</sup>. Dos ensaios mencionados cabe salientar o interesse muito especial do Swift, do Nakazima e do LDH. O primeiro ensaio é destinado à determinação da relação máxima de embutimento, apresentando um caminho de deformação em "estiramento". Os outros são largamente utilizados na determinação das Curvas Limite de Estampagem (CLE) pelo fato de permitir simular a quase totalidade dos caminhos de deformação.

A primeira tentativa de predição numérica das CLE foi realizada por Marciniak e Kuczynski<sup>(4)</sup>. O modelo, conhecido por MK, assume a existência de uma imperfeição inicial na forma de um sulco ou entalhe ao longo do material que cria uma região enfraquecida localmente.

Choi *et al.*<sup>(5)</sup> e Pishbin e Gillis<sup>(6)</sup> trabalharam em um outro método conhecido como JG, o qual assume que a deformação processa-se em três fases: (I) deformação homogênea até a carga máxima; (II) concentração de deformação sob carga constante; (III) e estrição localizada com queda abrupta da carga. Essas três fases são representadas matematicamente para, juntamente com a equação da curva de fluxo do material e das condições de contorno, constituir um sistema de equações que permita modelar o comportamento da chapa durante todo o processo de deformação.

Kwon *et al.*<sup>(7)</sup> utilizaram um método que utiliza o critério de instabilidade de cisalhamento localizado junto com um critério de escoamento para obter a CLE. Esse método assume que o cisalhamento localizado irá ocorrer quando a tensão de cisalhamento atinge um valor crítico. Os resultados são comparados com os obtidos pelo método MK, mostrando que o modelo adotado por Kwon *et al.* é mais conservativo que o de cisalhamento localizado. Outros autores<sup>(8-12)</sup> fizeram estudos de predição analítica das CLE, comparando os resultados obtidos dos diversos métodos e analisando os efeitos das propriedades do material no diagrama.

Graf e Hosford<sup>(13)</sup> utilizaram o método MK junto com o critério de escoamento de Logan e Hosford<sup>(14)</sup>, que é um caso particular do critério de escoamento de Hill'79, para estudar o comportamento da CLE com a variação dos parâmetros  $n$ ,  $m$ ,  $R$ ,  $a$  e  $f$ . Recentemente, Xu e Weinmann<sup>(15)</sup> utilizaram o critério de Hill de 1993 no estudo dos efeitos das propriedades do material na predição das CLE, mostrando que a forma do lugar geométrico do critério de escoamento tem grande influência nas deformações limites.

No presente trabalho foi feita a predição teórica e a validação experimental da curva limite de estampagem (CLE) para o aço inox AISI 304 quando submetido à trajetória de deformação linear. Na predição teórica do diagrama foi usado o método de MK. No cálculo foi utilizado o critério de escoamento de Hill'48 e a equação de Swift. Para o levantamento experimental da curva limite de estampagem foi utilizado: corpos de prova de tração não entalhados simulando uma trajetória de deformação de tração pura; corpos de prova de tração entalhados simulando trajetórias de deformação compreendidas entre tração pura e deformação plana e corpos de prova circular para obtenção de trajetórias representando expansão biaxial. Os corpos de prova circular foram

submetidos à expansão biaxial através do teste Jovignot (bulge-test). Para a determinação dos valores de deformação a estrição, com precisão, foi utilizado o método número 5 de Zurich.

## 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Amostras de chapa de aço inoxidável AISI 304, composição química apresentada na Tabela 1 e com 0,7mm de espessura foram usadas nesse trabalho para levantamento da curva limite de estampagem (CLE). O material apresentou um tamanho de grão médio de 30  $\mu\text{m}$  e os testes foram realizados utilizando taxas de deformação iniciais em torno de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Tabela 1 Composição química do aço inoxidável AISI 304.

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
0.055	18.2	1.8	8.1	0.031	0.001	0.357

Para levantamento da CLE foram utilizadas as trajetórias de deformação mostradas na Figura 1. Cada trajetória de deformação linear pode ser descrita através de um parâmetro  $\rho$  representativo do estado de deformação e dado por:

$$\rho = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \quad (1)$$

Admitindo um carregamento linear, pode-se afirmar que a trajetória de deformação de um ponto de um embutido representa o lugar geométrico das deformações do ponto em questão, ao longo da trajetória de deformação.

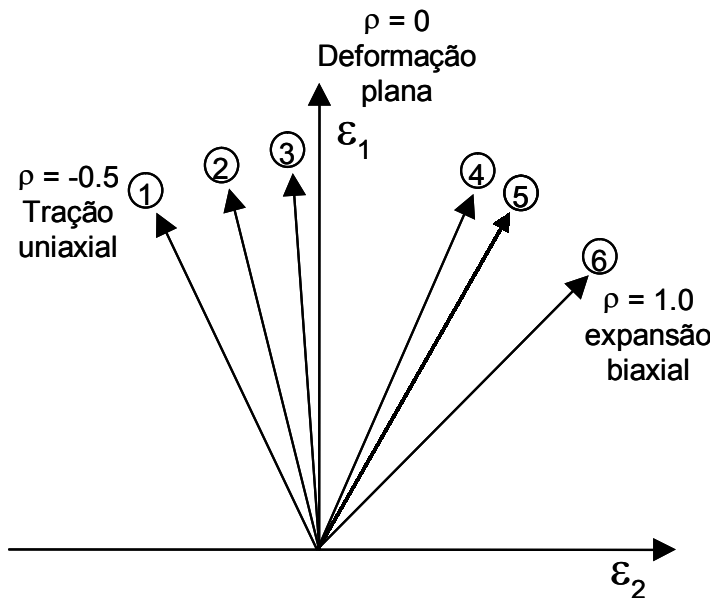


Figura 1. Caminhos de deformação utilizados no levantamento da curva limite de estampagem (CLE).

Para obtenção das trajetórias de deformação tração-compressão (expansão uniaxial) mostradas esquematicamente na Figura 1, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova não entalhados (Figura 2), trajetória de deformação 1 (tração uniaxial,  $\rho = -\frac{1}{2}$ ) e em corpos de prova entalhados (Figuras 3 e 4), trajetórias de deformação 2 e 3 (Figura 1). O resultado destes ensaios permitiu o levantamento de três pontos no lado esquerdo do diagrama limite de conformação (DLE). Além disso, os corpos de prova não entalhados (Figura 2) foram utilizados para

levantamento da curva de escoamento (fluxo) do material, do limite de escoamento e do coeficiente de anisotropia normal (R) em amostras retiradas a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação. O coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação foi obtido através da variação da taxa de deformação de  $10^{-3}$  para  $10^{-2}$  para uma deformação de 0,2.

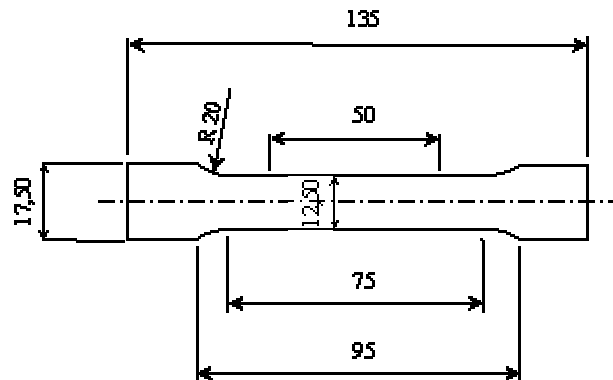


Figura 2. Desenho do corpo de prova não entalhado que foi utilizado para realização dos ensaios de tração, trajetória de deformação 1.

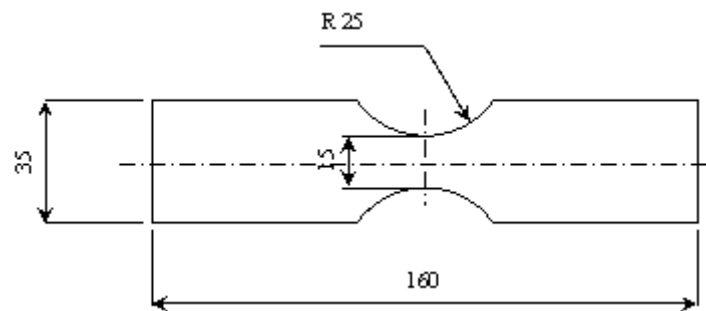


Figura 3. Desenho do corpo de prova não entalhado que foi utilizado para realização dos ensaios de tração, trajetória de deformação 2.

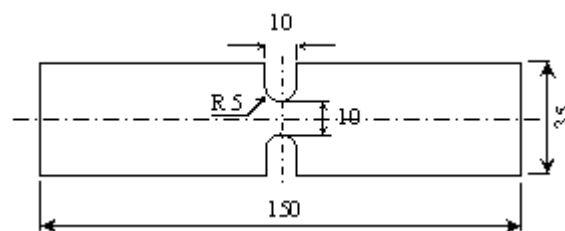


Figura 4. Desenho do corpo de prova não entalhado que foi utilizado para realização dos ensaios de tração, trajetória de deformação 3.

Para obtenção das trajetórias de deformação tração-tração (expansão biaxial), também mostradas na Figura 1, foram realizados ensaios Jovignot (*bulge test*, Figura 5) em corpos de prova circulares, com diâmetro de 250 mm. Para-se conseguir as trajetórias de deformação 4 e 5 foram utilizadas duas matrizes elípticas com diagonal maior de 150 mm e diagonal menor de 70 e 90 mm respectivamente. A trajetória deformação 6 (expansão biaxial,  $\rho = 1$ ) foi obtida usando uma matriz circular com diâmetro de 150 mm.

Todos os corpos de prova foram submetidos, em uma das faces, a impressão eletroquímica de malha de círculos. Para os corpos de prova de tração foram impressas malhas circulares secantes com 2 mm de diâmetro e para os corpos de prova circulares as malhas foram circulares secantes com 3 mm de diâmetro. Os diâmetros dos círculos das malhas foram medidos antes e após a deformação ao longo de duas direções de interesse, a partir de ou tendo como referência um sistema de eixos perpendiculares (“cruzetas”) localizado no centro geométrico de cada círculo ou no centro do corpo de prova de tração. Essas direções de interesse são paralelas (DL) e perpendiculares (DP) à direção de laminação das chapas. Para determinação das deformações limite na estrição foi utilizado o método número cinco de Zurich<sup>(1)</sup>.

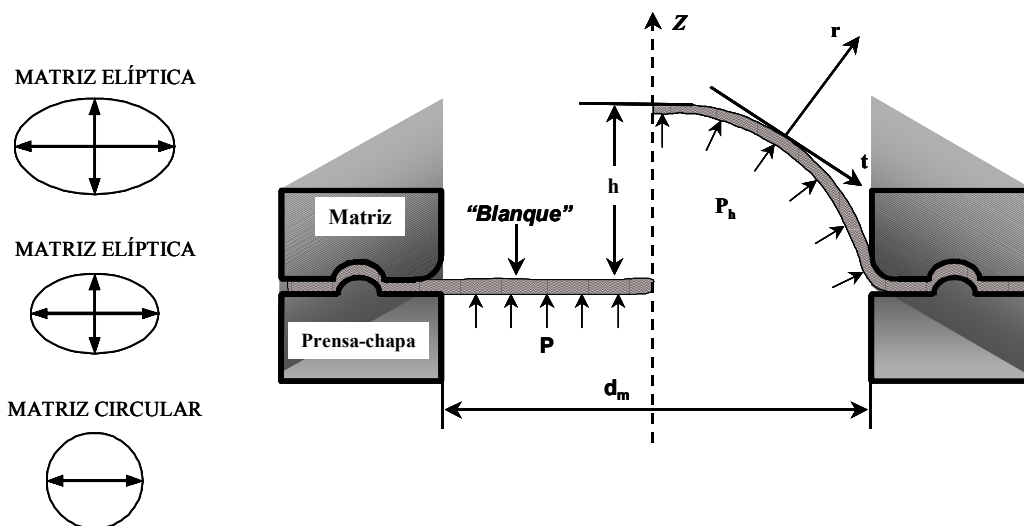


Figura 5. Desenho esquemático do ensaio Jovignot (*bulge test*) com as respectivas matrizes, circular e elíptica, usadas na obtenção dos caminhos de deformação 4, 5 e 6.

### 3. ANÁLISE TEÓRICA

A simulação da instabilidade plástica foi feita usando a análise de Marciniak-Kuczinsky (M-K). Considera-se o material plástico rígido e a condição de tensão plana e encruamento isotrópico do material são assumidas.

Uma descrição detalhada do método M-K, esquematicamente ilustrado na Figura 6, pode ser encontrado em diversas publicações<sup>(5)</sup>. O modelo é baseado no crescimento de um defeito inicial na forma de um entalhe estreito inclinado de um ângulo  $\psi_0$  com relação ao eixo principal. O valor inicial do defeito geométrico é caracterizado pela razão  $e_0^b / e_0^a$ , onde  $e_0^a$  e  $e_0^b$  são a espessura inicial na região homogênea e no entalhe respectivamente. Os eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$  correspondem às direções de laminação, transversal e normal da chapa, ao passo que 1 e 2 representam as direções das tensões e deformações principais na região homogênea. O conjunto de eixos dentro do entalhe é representado por  $n$ ,  $t$  e  $z$ , em que  $t$  é a direção longitudinal. Estas duas regiões do material são submetidas à deformação plástica quando se aplica um estiramento incremental constante na parte homogênea. O fluxo plástico ocorre em ambas as regiões, mas a evolução das taxas de deformação é diferente nas duas zonas. Quando a localização de fluxo ocorre no entalhe para uma deformação crítica na região homogênea, a deformação limite da chapa é alcançada. Além disso, a deformação maior é assumida por ocorrer ao longo do eixo  $x$ . O critério de estrição de Marciniak-Kuczinski assume que a localização de fluxo plástico ocorre quando o incremento de deformação equivalente na região da imperfeição ( $d\bar{\epsilon}^b$ ) é dez vezes maior que na zona homogênea ( $d\bar{\epsilon}^a$ ). Quando o critério de estrição é alcançado o cálculo é interrompido e as deformações correspondentes ( $\epsilon_{xx}^a, \epsilon_{yy}^a$ ) acumuladas até aquele momento na zona homogênea são as deformações limite. A análise é repetida para diferentes

valores de  $\psi_0$ , entre 0 e 90°, e o ponto limite da CLE é obtido após minimização da curva  $\varepsilon_{xx}^d$  em função de  $\psi_0$ .

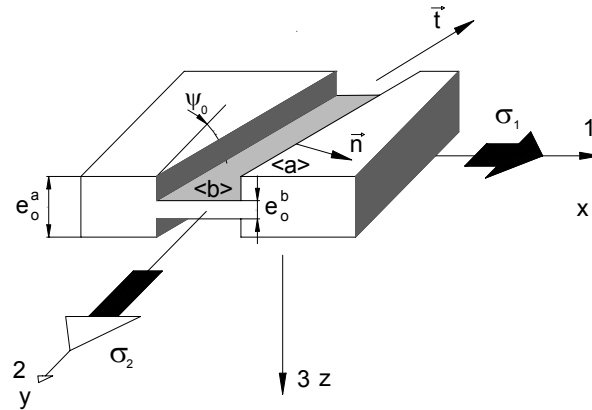


Figura 6. Defeito inicial da análise M-K.

Cada material é completamente definido macroscopicamente por sua superfície de escoamento e sua equação de fluxo  $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ , no presente trabalho, representada pela equação de Swift:

$$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) = k * (\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon})^n * \dot{\varepsilon}^m \quad (2)$$

Em que  $\bar{\sigma}$  é a tensão efetiva,  $\bar{\varepsilon}$  é a deformação efetiva e  $k$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\varepsilon_0$  são constantes do material.

A superfície de escoamento do material é descrita pela função de escoamento de Hill'48<sup>(17)</sup>, a qual é certamente a equação mais popular para descrever o comportamento de materiais ortotrópicos tais como chapas laminadas. A função de escoamento de Hill'48 tem a forma:

$$\bar{\sigma}_{YF}^2 = \sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (F + H)\sigma_y^2 + 2P\sigma_{xy}^2 \quad (3)$$

Em que F, H e P podem ser calculados usando os coeficientes de anisotropia  $R_0$ ,  $R_{45}$  e  $R_{90}$ .

Os resultados apresentados na próxima seção foram obtidos usando código FLD<sup>(18)</sup>.

#### 4. RESULTADOS

A chapa de aço inoxidável 304 em estudo foi caracterizada pelos valores do coeficiente de anisotropia apresentados na Figura 7, limite de escoamento apresentados na Figura 8 e pela equação de Swift (fluxo) obtida para amostras tracionadas segundo um eixo de carregamento coincidente com a direção de laminação apresentada na equação 4.

$$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) = 1527 * (0.01 + \bar{\varepsilon})^{0.47} * \dot{\varepsilon}^{0.012} \quad (4)$$

Conhecendo o forte efeito da forma da superfície de escoamento na estirabilidade, na parte direita do diagrama limite de conformação para trajetórias de deformação lineares, a capacidade do critério de escoamento de Hill'48 para descrever o comportamento do material também foi estudada. Portanto, a distribuição predita do coeficiente de anisotropia e a tensão de escoamento normalizada com relação ao ângulo com a direção de laminação são mostradas nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

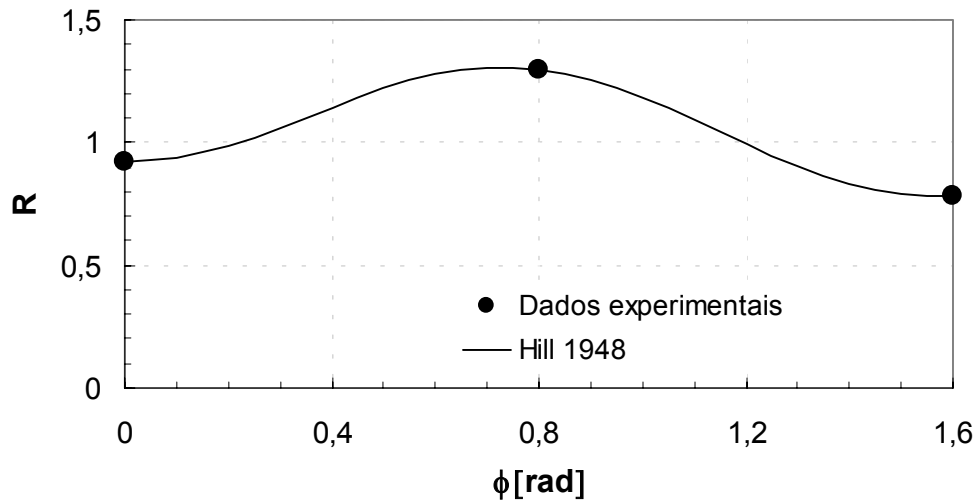


Figura 7. Coeficiente de anisotropia (R) em função do eixo de carregamento em tração.

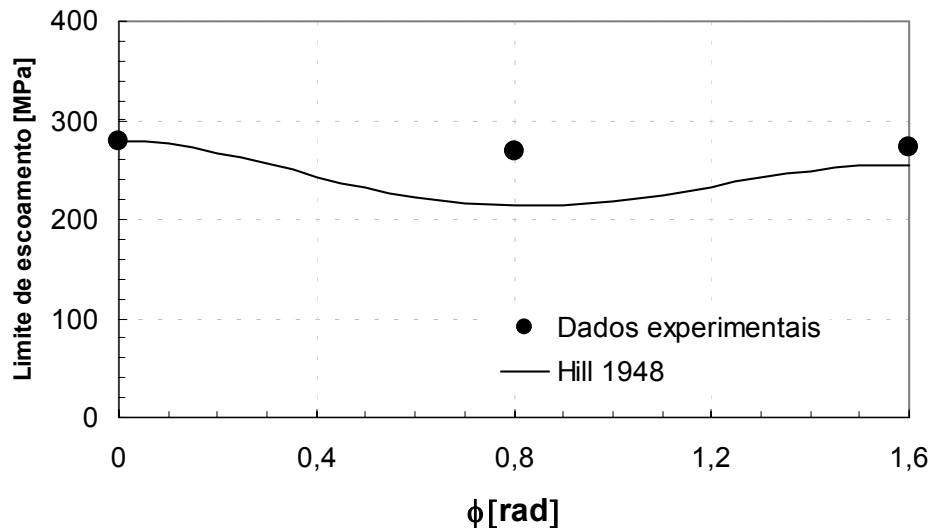


Figura 8. Limite de escoamento em função do eixo de carregamento em tração.

A Figura 7 mostra que a distribuição prevista do coeficiente de anisotropia normal em função do eixo de carregamento em tração, para o intervalo compreendido entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , por Hill'48 está em concordância com os dados experimentais.

Na Figura 8 pode ser visto que Hill'48 tende a reproduzir a forma da distribuição do limite de escoamento, mas os valores previstos estão um pouco diferente dos valores encontrados experimentalmente.

Buscando obter melhor ajuste com os dados experimentais o valor inicial do defeito geométrico M-K é considerado como sendo igual a 0,955, este valor sendo menor que o valor de defeito considerado correto de acordo com trabalhos anteriores realizados por Barlat baseados em análise microestrutural que está entre 0,996 e 0,998.

A Figura 9 mostra previsões muito boas das deformações limite em trajetórias de deformação lineares obtidas usando Hill'48 e equação de encruamento de Swift. Uma redução de formabilidade evidente foi observada para condições de deformação plana, deste modo confirmando resultados anteriores obtidos para diversos metais<sup>(19)</sup>. A excelente concordância entre a curva simulada e os dados experimentais avalia o bom desempenho de Hill'48 na previsão do limite de conformação para carregamento proporcional para o aço inoxidável AISI 304 estudado.

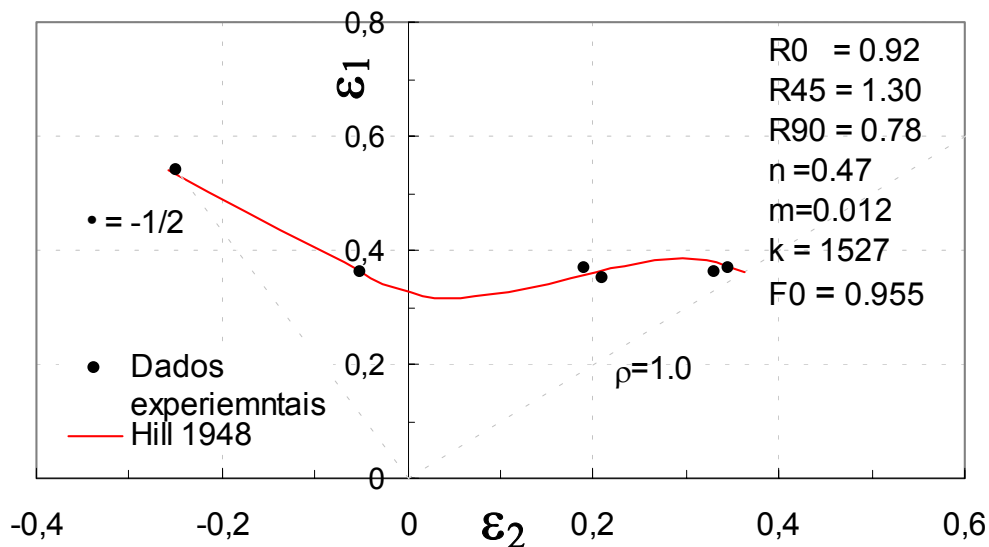


Figura 9. Diagrama limite de conformação teórico e experimental obtido para trajetórias de deformação lineares para o aço inoxidável AISI 304.

## 5. CONCLUSÕES

Uma ótima correlação é observada entre as deformações limites obtidas experimentalmente e a curva limite de estampagem (CLE) obtida numericamente usando o método M-K quando, a forma da curva de escoamento é descrita pelo critério de Hill'48 e o escoamento plástico representado pela equação de Swift.

Foi observada uma excelente capacidade da combinação do critério de escoamento de Hill'48 com a equação de escoamento plástico de Swift para estimar corretamente a curva limite de estampagem (CLE) para o aço inoxidável 304 quando submetido a trajetórias de deformação lineares.

## 6. AGRADECIMENTOS

M. C. Butuc agradece a Fundação Portuguesa de Ciência e Tecnologia (FCT) pelo suporte financeiro e H. B. Campos agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro através do processo BEX1132/00-8.

## 7. REFERÊNCIAS

1. DUARTE, J. M. F. **Conformação Plástica de Chapas Metálica: Simulação Numérica e Caracterização Mecânica**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 1997.
2. HOSFORD, W. F. and CADDELL, R. M. **Metal Forming - Mechanics and Metallurgy**. 2ª Edition, New Jersey, PTR Prentice-Hall, 1993.
3. GOSH, A. K., HECKER, S. S. and KEELER, S. P. **Sheet Metal Forming and Testing**. In: Workability testing techniques, DIETER, G. E. (editor), Metals Park. American Society for Metal, pp. 133-195. 1984.
4. MARCINIAK, Z. and KUCZYNSKI, K. Limit Strains in the Processes of Stretched-Forming Sheet Metal, **International Journal of Mechanical Science**, v. 9, p. 609-620, 1967.
5. CHOI, W.; GILLIS, P. P. and JONES, S. E. Calculation of the Forming Limit Diagram, **Metallurgical Transactions A**, v. 20A, p. 1975-1987, 1989.



6. PISHBIN, H.; and GILLIS, P. P. Forming Limit Diagrams Calculated Using Hill's Nonquadratic Yield Criterion, **Metallurgical Transactions A**, v. 23A, p. 2817-2831, 1992.
7. KWON, J. W.; LEE, D. N. and KIM, I. Forming Limit Diagrams of Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheets, **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 31, p. 613-618, 1994.
8. MAMALIS, A. G.; KARAFILLIS, A. P. and VAXEVANADIS, N. M. Prediction of the Limit Strains of Sheet Steel Thermally and Mechanically Worked in Relation to Surface Integrity Changes: A Theoretical Model, **Journal of Material Processing Technology**, v. 25, p. 15-33, 1991.
9. GRAF, A. F. and HOSFORD, W. F. Calculations of Forming Limit Diagrams for Changing Strain Paths, **Metallurgical Transactions A**, v. 24A, p. 2497-2501, 1993.
10. GRONOSTAJSKI, J. and ZIMNIAK, Z. J. A Few Methods of Analytical Calculation of Forming-Limit Curves, **Journal of Material Processing Technology**, v. 55, p. 213-217, 1995.
11. ZHAO, L.; SOWERBY, R. and SKLAD, M. P. A Theoretical and Experimental Investigation of Limit Strains in Sheet Metal Forming, **International Journal of Mechanical Science**, v. 38, p. 307-317, 1996.
12. BLECK, W.; DENG, Z.; PAPAMANTELOS, K. and GUSEK, C. O. A Comparative Study of the Forming-Limit Diagram Models for Sheet Steels, **Journal of Material Processing Technology**, v. 83, p. 223-230, 1998.
13. A. F. GRAF AND W. F. HOSFORD, Calculations of forming limit diagrams", **Metallurgical Transactions A**, v. 21A, p. 87-94, 1990.
14. LOGAN, R. and HOSFORD, W. F. Upper-Bound Anisotropic Yield Locus Calculations Assuming  $\langle 111 \rangle$  - Pencil Glide, **International Journal of Mechanical Science**, v. 22, p. 419-430, 1980.
15. XU, S. and WEINMANN, K. J. Prediction of forming limit curves of sheet metal using Hill's 1993 user-friendly yield criterion of anisotropic materials, **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 40, p. 913-925, 1998.
16. FERNANDES, L. F. **Avaliação do Critério de Ruptura na Simulação de Estampagem Baseado em Curvas Limite de Conformação**, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, (1999).
17. HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, **Proc. Roy. Soc. London**, v. A193, p. 281-297, 1948.
18. M.C. BUTUC, A. BARATA DA ROCHA, J.J. GRACIO AND J. FERREIRA DUARTE, A more general Model for Forming Limit Diagrams Prediction, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 213-218, 2002.
19. A. BARATA DA ROCHA, F. BARLAT AND J. M. JALINIER, Prediction of the Forming Limit Diagram of Anisotropic Sheets in Linear and Non-Linear Loading, **Mat. Sci. Eng.**, v. 68, p. 151-164, 1984.

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT DIAGRAM FOR AISI 304 STAINLESS STEEL**

### **Haroldo Béria Campos**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Pampulha, B. Hte., Minas Gerais, Cep. 31270-901, [beriacampos@uol.com.br](mailto:beriacampos@uol.com.br)

### **Carmem Butuc**

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

### **José Joaquim Grácio**

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

**João E. Rocha**

Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.

**José Manuel Ferreira Duarte**

Dep. Eng<sup>a</sup> Mecânica, Universidade do Porto, 4099 Porto Codex, Portugal.

**Abstract.** *The theoretical prediction was made and the experimental validation of the curve has limited of stamping (CLE) for the AISI 304 austenitic stainless steel when submitted to the trajectory of linear deformation. In the theoretical prediction of the diagram the method of Marciniak - Kuczynski was used (M-K). In the calculation the criterion of draining of Hill'48 was used. For the experimental survey of the curve it has limited of stamping was used: bodies of not grooving test of traction simulating a trajectory of deformation of pure traction; bodies of grooving test of traction simulating trajectories of deformation understood between pure traction and plain deformation and bodies of circular test for attainment of trajectories representing biaxial expansion. The bodies of circular test had been submitted to the biaxial expansion through the Jovignot test (bulge-test). For the determination of the values of deformation the reduction of area was used the method number 5 of Zurich. Using a factor of heterogeneity of 0.955 excellent adjustment of the curve was gotten has limited theoretically of stamping predicted with that one gotten experimentally.*

**Keywords:** *Forming limit curve, MK method, AISI 304 stainless steel, forming limit diagram.*