

Estampagem

Transdutores permitem medir força em operações de repuxo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para determinar e avaliar a força de estampagem de acordo com o deslocamento e formato do punção, tipo de material e diâmetro da geratriz cilíndrica. A prensa usada foi monitorada por uma célula de carga com extensômetro de resistência elétrica do tipo ½ ponte de Wheastone, para medir a força, e um sensor de deslocamento indutivo para medir a profundidade de estampagem. Os resultados foram apresentados em gráficos, que mostram a força máxima em função do deslocamento para o punção cilíndrico, que caracteriza o embutimento profundo. Foram usadas três amostras: aço *inox*, aço EEP e alumínio.

J. L. Ferrarini e L. Schaeffer

O monitoramento dos processos de conformação mecânica é uma etapa fundamental para a manutenção e o controle da qualidade dos componentes produzidos na indústria. No processo de estampagem (repuxo), o controle e o acompanhamento do nível da força não só fornece informações sobre desgastes prematuros das ferramentas, mas também torna possível sua manutenção preventiva. A força de estampagem é influenciada por vários fatores, tais como: tipo de material, espessura da chapa, profundidade de estampagem e formato do punção. Neste trabalho, parâmetros

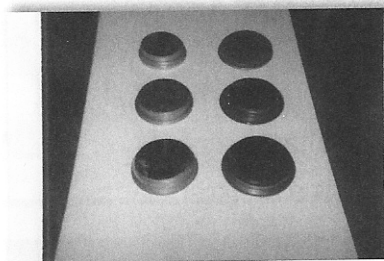


Fig. 1 – Geratriz cilíndrica dos materiais

como a espessura da chapa, além do diâmetro e do tipo de punção, foram mantidos constantes.

No processo de estampagem ocorrem efeitos do embutimento profundo *versus* estiramento, e dificilmente estes fenômenos ocorrem isoladamente. Neste trabalho, foi enfatizada a determinação da forma máxima aplicada por meio de transdutores. Por isto, os

ensaios foram realizados apenas com o punção cilíndrico, de modo a simplificar o trabalho proposto, que consiste na medição da força e do deslocamento do punção.

A força de estampagem foi medida com um transdutor extensométrico resistivo. Já a profundidade de estampagem foi medida com um sensor transdutor indutivo. A força de estampagem pode ser calculada pela equação a seguir:

$$F = \pi(d + s) \cdot s \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} [N] \quad (Eq.1.1)$$

onde:

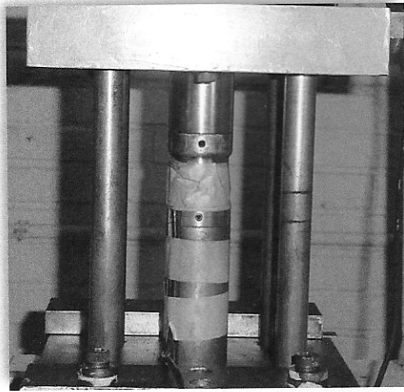


Fig. 2 – Ferramenta do LdTM da UFRGS e célula de carga

D = Diâmetro da geratriz (mm);
 d = Diâmetro do punção (mm);
 s = Espessura da chapa (mm);
 R_m = Limite de resistência (N/mm²);
 β = D/d - Relação de estampagem utilizada (-);
 β_{max} = Relação de estampagem máxima do material (-).

Materiais e equipamentos

Os materiais usados para os ensaios foram: aço inox com geratriz cilíndrica com 105 mm e 100 mm de diâmetro; aço EEP com geratriz cilíndrica com 105 mm e 100 mm de diâmetro e alumínio com geratriz cilíndrica com 95 mm e 90 mm de diâmetro. Todas as amostras de material têm espessura de 1 mm. Os materiais cortados com geratriz cilíndrica são mostrados na figura 1 (pág. 42).

Equipamentos para ensaio de estampagem do LdTM da UFRGS

Para os ensaios realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi utilizada uma prensa hidráulica modelo Dan Presse, instrumentada com ferramenta e célula de carga para medição da força, conforme mostra a figura 2. Já o sensor



Fig. 3 – Sensor transdutor indutivo e célula de carga

transdutor indutivo é mostrado na figura 3, e a figura 4 mostra a ferramenta com punção cilíndrico para os ensaios de estampagem.

Transdutor para medição da força de estampagem

Para a medição da força foi usada uma célula de carga acoplada no punção da ferramenta (figura 4), com um extensômetro de resistência elétrica em meia ponte. Durante a estampagem, com duração de aproximadamente 10 segundos, a célula de carga sofreu uma deformação elástica $\epsilon = \Delta L / L$, que foi transmitida ao extensômetro de resistência elétrica (figura 2). O transdutor usado apresenta as seguintes características:

- sensibilidade da ponte:
 $S_p = \Delta V / (\Delta R / R)$ (V);
 (Eq. 3.1)
- sensibilidade do extensômetro:
 $K = (\Delta R / R) / (\Delta L / L)$ (-);
 (Eq. 3.2)

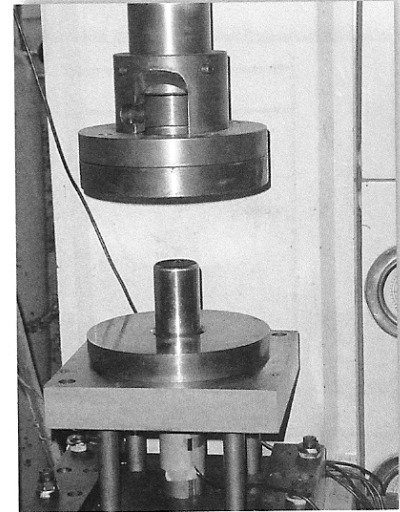


Fig. 4 – Ferramenta do LdTM da UFRGS e célula de carga

- sensibilidade da célula de carga:

$$S_c = (\Delta L / L) / F \text{ (N)}; \quad (\text{Eq. 3.3})$$

- a sensibilidade (S) do transdutor é calculada por:

$$S = S_p \cdot K \cdot S_c \text{ (V.N)}; \quad (\text{Eq. 3.4})$$

- as deformações da célula de carga $\epsilon = \Delta L / L$ são da ordem de $1 \mu\text{m/m}$.

O diagrama mostrado na figura 6 (pág. 44) apresenta o fluxo de processamento da informação desde a excitação (força) até a resposta. O extensômetro de carga foi acoplado a um circuito elétrico de 1/2 ponte de Wheastone. A figura 7 (pág. 44) mostra o circuito elétrico usado para calcular a voltagem de saída do transdutor da célula de carga. Com a equação 3.5 é possível calcular a tensão de saída v_o :

$$v_o = V_{EXC} \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] \quad (\text{Eq. 3.5})$$

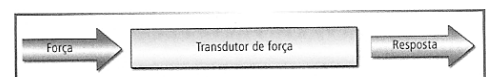


Fig. 5 – Fluxograma do transdutor

Estampagem

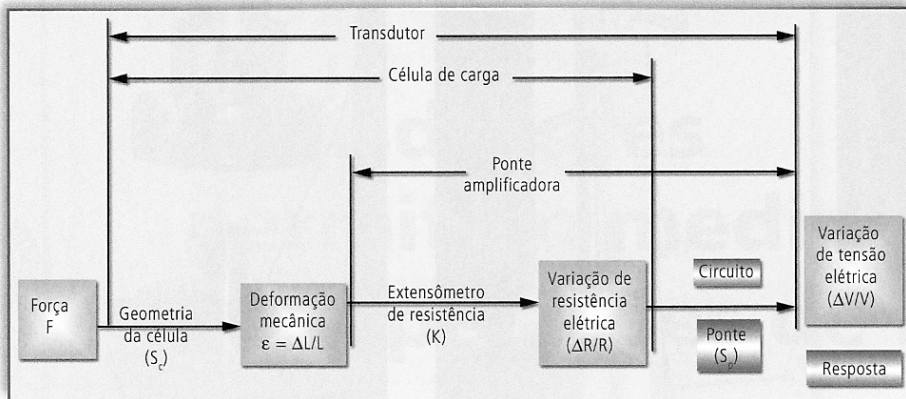


Fig. 6 – Diagrama de fluxo do extensômetro de carga

onde:

R – Resistência elétrica (Ω);

v_o – Voltagem de saída do transdutor de célula de carga (V);

V_{exc} – Voltagem de excitação (V);

R_1, R_2, R_3 e R_4 – Resistências da ponte de Wheatstone (Ω).

Transdutor indutivo para medição da profundidade de estampagem

Para medir a profundidade de estampagem foi utilizado um transdutor sensor indutivo do tipo deslocamento, constituído por um núcleo ferromagnético e bobina com enrolamento previamente projetado para a função no equipamento (figura 3). São robustos e permitem excelente repetibilidade, além de possuírem boa precisão e resolução. Transdutores indutivos permitem ler deslocamentos da ordem de $1\mu\text{m}$ até $1\eta\text{m}$. A figura 8 mostra o circuito elétrico para calcular a voltagem de saída do transdutor indutivo utilizado. Com a equação 4.1 (ao lado) é possível calcular a tensão de saída v_o .

Resultado do ensaio

A figura 9 (pág. 46) mostra o resultado do ensaio das três amostras estampadas com punção cilíndrico, e registra o valor da força máxima de estampagem, em toneladas, em função do deslocamento (profundidade de estampagem), em milímetros. Ao analisar o gráfico da força de estampagem versus deslocamento,

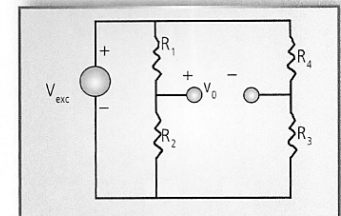


Fig. 7 – Circuito elétrico do transdutor da célula de carga

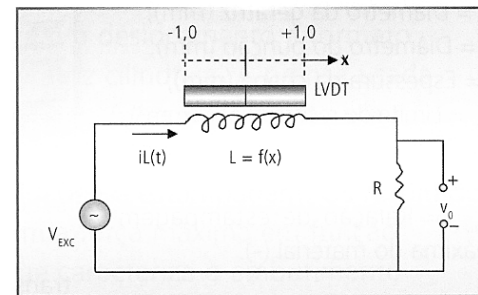


Fig.8 – Circuito elétrico do transdutor indutivo

percebe-se que a melhor condição ocorre nos seguintes casos:

1º Inox 304- $F_{max} = 10,52 \text{ t} = 103.201,2 \text{ N}$, com geratriz de $D = 100 \text{ mm}$;

2º Aço EEP- $F_{max} = 5,45 \text{ t} =$

$$v_o = \left(\frac{RA}{\sqrt{R^2 + (wt)^2}} \right) \cos (wt + \emptyset) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Legenda:

LVDT – Linear Variable Diferential Transformer;

v_o – Voltagem de saída do transdutor (V);

L – Indutor (Tesla);

V_{exc} – Voltagem de excitação (V);

V_L – Voltagem do indutor (V);

i – Intensidade de corrente elétrica (A);

w – Velocidade angular (rd/s);

R – Resistência elétrica (Ω);

A – Amplitude (mm);

\emptyset – Fase inicial (rd);

t – Tempo(s);

x – Deslocamento (mm).

Estampagem

53.464,5 N, com geratriz de
D = 100 mm;

3º Alumínio- $F_{\max} = 1,29 \text{ t} =$
12.654,9 N, com geratriz de
D = 90 mm.

Cálculo da força pela equação 1.1

Utilizando a equação 1.1 para as três amostras de material, é possível calcular a força de estampagem a seguir:

Aço inoxidável AISI 304:

D = 100 mm;

d = 50 mm;

s = 1,00 mm;

$\beta_{\max} = 2,1$ (ref.9);

$\beta = D/d = 100\text{mm}/50\text{mm} = 2,0$;

$R_m = 630 \text{ MPa}$.

$$F = \pi(d + s).s.R_m .$$

$$. 1,2 . \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1} [N]$$

$$F = \pi (50 + 1).(1).(630) .$$

$$. (1,2) . \frac{2,0 - 1}{2,1 - 1} = 110.116,7 \text{ N}$$

Aço-carbono EEP:

D = 100 mm;

d = 50 mm;

s = 1 mm;

$\beta_{\max} = 2,2$ (ref.9);

$\beta = D/d = 100\text{mm}/50\text{mm} = 2$;

$R_m = 319 \text{ MPa}$.

$$F = \pi(d + s).s.R_m .$$

$$. 1,2 . \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1} [N]$$

$$F = \pi (50 + 1).(1).(319) .$$

$$. (1,2) . \frac{2,0 - 1}{2,2 - 1} = 51.108,5 \text{ N}$$

Alumínio:

D = 90 mm;

d = 50 mm;

s = 1,00;

$\beta_{\max} = 2,1$ (ref.9);

$\beta = D/d = 90 \text{ mm}/50\text{mm} = 1,8$;

$R_m = 220 \text{ MPa}$.

$$F = \pi(d + s).s.R_m .$$

$$. 1,2 . \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1} [N]$$

$$F = \pi (50 + 1).(1).(220) .$$

$$. (1,2) . \frac{1,8 - 1}{2,1 - 1} = 30.878 \text{ N}$$

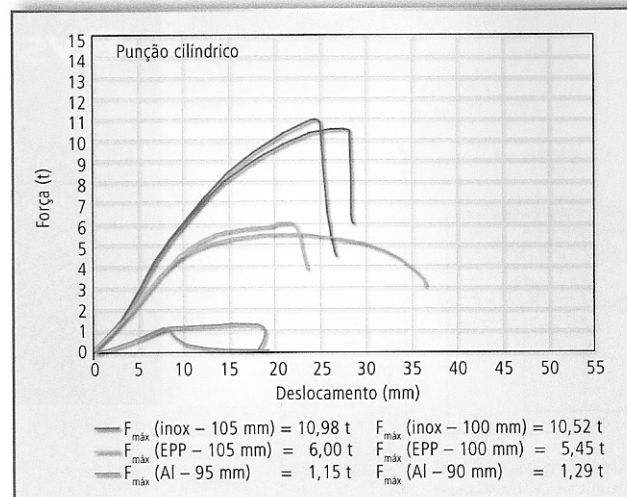


Fig. 9 – Resultados dos ensaios das três amostras analisadas

Conclusão

Por meio do resultado do ensaio, registrado no gráfico da figura 9, e dos resultados dos cálculos obtidos da equação 1.1, é possível concluir que:

- 1º Os transdutores apresentaram uma grande eficiência na medição das grandezas físicas, tais como força e profundidade de estampagem;
- 2º Nos casos do aço *inox* 304 e do aço EEP, os resultados obtidos para determinar a força de estampagem com o uso de transdutores se aproximam dos valores obtidos com a utilização da equação 1.1. Para estes dois materiais, a equação 1.1 serve como referência para estimar a força de estampagem;

- 3º Para o alumínio, o valor da força encontrado com o uso da equação 1.1 é muito maior do que o valor determinado com o uso de transdutor. Neste caso, a equação não serve como referência para estimar a força de estampagem;
- 4º Para o aço *inox* 304, o valor da força calculado pela equação 1.1 é aproximadamente 12% maior do que o valor obtido pela medição do transdutor. Para o aço EEP, o valor da força obtido pela equação é aproximadamente 5% menor do que o valor obtido com uso do transdutor.

Referências

- 1) BORCHARDT, I.G., ZARO, Milton. *Extensômetros de Resistência Elétrica*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1981.
- 2) CAUDURO, C. R. *Uma metodologia para Auxílio de Projeto Mecânico de Transdutores Extensômetros*, 1992. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- 3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Célula de Carga; Terminologia; Projeto de Norma 4: 6.0,5-005*. Rio de Janeiro, 1985.
- 4) WEBER, Albano Luiz. *Dispositivo para Medição Simultânea de Compressão e Torque*, 1997. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- 5) RALEIGH, Measurements Group. *Strain Gage Based Transducers*. 1979.
- 6) SOISSN, H. E. *Instrumentação Industrial*. São Paulo: Editora Hemus, 1987.
- 7) *Metal Forming Handbook / Schuler*. Taylan Altan. Berlim (Alemanha): 1998. CD-ROM.
- 8) BORSOI, C. A., HENING, R. e SHAEFFER, L. Novo Teste Tecnológico no LdTM para Melhor Determinação da Conformabilidade de Chapas Metálicas. In: *III CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS*. Porto Alegre: 2000. Atas.
- 9) HENING, R. *Vergleichende Untersuchungen zur Numerischen Simulation des Tiefziehens nichtzylindrischer Rotationssymmetrischer und Nichtrotationssymmetrischer Teile*, 1997. Tese de Doutorado, Dresden (Alemanha).

