

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAL PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE SWIFT EM UMA MÁQUINA UNIVERSAL

Bruno Lopes Pinheiro, lussivo@gmail.com
Paulo César de Matos Rodrigues, paulocmr@ufmg.br
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901

Resumo: A estampagem é um processo de fabricação de grande importância no que tange à deformação de chapas, com singular destaque para a indústria automobilística, aeroespacial, alimentícia, produtos domésticos, decorativos, entre outros. Para a realização da estampagem, necessitam-se de várias informações a respeito do comportamento mecânico das chapas, sendo o Limite de Estampagem (“Limiting Drawing Ratio” - LDR) um dos parâmetros de maior destaque para a estampagem profunda. Entre os diversos testes propostos existentes, o mais aceitável para a estampagem profunda é o Teste de Swift (“Swift Cup Test”), pois através deste é possível simular condições de produção, bem como assegurar que as diversas variáveis do teste podem ser repetidas. O presente trabalho tem como objetivo principal o projeto e a fabricação de um conjunto (matriz, punção e prensa-chapa) que fosse facilmente adaptado a uma máquina universal de ensaios, possibilitando a realização do Teste de Swift. Ensaios realizados em uma chapa de aço para estampagem extra profunda (EEP) indicaram que o desempenho do conjunto foi bastante satisfatório. A utilização do conjunto para realização de testes de Swift em chapas com espessura de 0,60 mm apontou um LDR de $2,17 \pm 0,02$ e força máxima de estampagem de aproximadamente 45kN.

Palavras-chave: teste de Swift, LDR, estampagem profunda, projeto mecânico e processos de fabricação

1. INTRODUÇÃO

A estampagem, ou embutidura, é amplamente utilizada por vários setores da indústria, sendo um dos principais processos de conformação de chapas metálicas. No segmento automobilístico, fica evidente na fabricação de diversas peças para a carroceria (painéis de porta, capô, tampas, etc.). Nos setores aeroespacial e aeronáutico, é empregada na manufatura de partes utilizadas nas asas e fuselagens. Utensílios domésticos, como por exemplo, painéis, bandejas, vasilhames e etc. também têm a sua origem na estampagem. Torna-se, portanto, evidente a importância deste processo de conformação para a vida contemporânea.

A estampagem pode ser definida como sendo um processo de fabricação no qual uma estampa plana (chapa) de um determinado material metálico é forçada a escoar pela ação de um punção para o interior de uma matriz, gerando a peça desejada. As ferramentas são constituídas basicamente por três elementos: matriz, punção e prensa-chapa. Para a estampagem de peças cilíndricas as principais dimensões são os diâmetros externo (punção) e interno (matriz), os raios de canto (punção e matriz) e a folga radial (metade da diferença entre os diâmetros externo do punção e interno da matriz). A folga radial poderá ser superior, igual ou inferior à espessura da chapa, dependendo das necessidades do processo. Durante a estampagem é aplicada uma força no punção a fim de garantir o escoamento da chapa para o interior da matriz e outra no prensa-chapa para controlar esta entrada, evitando o aparecimento de enrugamento na peça estampada.

O processo de estampagem, como definido por Rodrigues e Martins (2005), tem o seu início quando o punção entra em contato com a chapa que se encontra presa entre a matriz e o prensa-chapa gerando deformações elásticas. Com o contínuo avanço do punção deformações plásticas começam a ocorrer nas zonas do fundo e do raio do punção, reduzindo a espessura da chapa nestes locais. Quando se iniciam as deformações plásticas na área da aba tem-se o término da primeira fase de estampagem. Com o início da segunda fase, as zonas do fundo e do raio de canto do punção voltam a trabalhar em regime elástico. O processo é concluído quando todo o material encontra-se no interior da matriz.

O coeficiente limite de estampagem (“Limit Drawing Ratio” - LDR), ou Razão Crítica dos Diâmetros (RCD), é definido como sendo o maior valor para a razão entre o diâmetro do branco (D_0) e o diâmetro final do copo (d) em que o processo de estampagem foi efetuado com sucesso, isto é, sem a presença de defeitos. Usualmente, o LDR é utilizado para medir a capacidade de estampagem de um dado material, sendo dado pela Eq.(1).

$$LDR = \frac{D_0}{d} \quad (1)$$

Dieter (1984) apresenta o Teste de Swift (“Swift Cup Test”) como sendo o melhor teste para a determinação do LDR de um dado material, pois nele é possível simular as condições de produção. Verma e Chandra (2006) também sugerem o Teste de Swift como sendo o mais aconselhável.

Com o objetivo de garantir a padronização dos resultados, para o Teste de Swift têm-se:

- Os raios de canto do punção e da matriz devem ter o valor de ¼ pol., ou seja, 6,35mm;
- O raio de canto da matriz e a sua superfície devem possuir baixa rugosidade, sendo polidos;
- As superfícies em contato com o blanque (blanque/matriz e blanque/prensa-chapa) devem estar totalmente lubrificadas;
- O punção deve estar limpo e isento de lubrificação;
- A pressão do prensa-chapa deve ser suficiente para prevenir o surgimento de enrugamento, porém não excessiva;
- A folga entre o punção e a matriz irá depender da espessura da chapa, observando a importância de não se gerar “ironing”

O diâmetro utilizado para o punção é de 50 mm. A chapa utilizada nos testes possui espessura de 0,60 mm, sendo recomendada uma folga radial de 0,70 mm (ASM apud Rodrigues e Martins, 2005; Huang e Chen, 1996; Oeher e Kaiser apud Rodrigues e Martins, 2005 e Dieter, 1984) e, conseqüentemente, um diâmetro interno da matriz de 51,40 mm.

De acordo com Rodrigues e Martins (2005), o valor teórico máximo para LDR é 2,703, entretanto, não é possível atingir valores desta magnitude experimentalmente. Apesar de não apresentar a metodologia utilizada para os cálculos, Hill (apud Leu, 1999), sugere um LDR teórico máximo de 2,718. Em ambos os casos o material é considerado isotrópico e o efeito do encruamento é desprezado.

A determinação experimental do LDR é feita através de sucessivos testes em que o diâmetro do blanque é aumentado até que a falha ocorra. Este processo de tentativa e erro é bastante dispendioso, porém pode ser otimizado caso já se tenha uma estimativa inicial para o material. Sabe-se que a maioria dos materiais apresenta valores de aproximadamente $2 \pm 0,20$, sendo utilizado na maioria dos ensaios de 6 a 10 blanques, variando o diâmetro em incrementos de 1mm (intervalos de 0,02 D/d).

O LDR tem sido investigado por vários pesquisadores ao longo dos últimos anos, indicando a sua importância no que tange à deformação de chapas. Mir and Hillier apud Leu (1999), Colgan e Monaghan apud Verna e Chandra (2006) e Gavas e Izciler (2006) investigaram o efeito da força aplicada pelo prensa-chapa no valor do LDR. Moshksar e Zamanian (1997), Leu (1999), Verma e Chandra (2006), Huang e Chen (1995) concluíram que um aumento no LDR é observado para maiores raios de canto da matriz. Huang e Chen (1996) também estudaram a influência da folga radial sobre o LDR. Huang e Cheng (1997), Leu (1999) e Verma e Chandra (2006) pesquisaram sobre a influência do atrito no LDR, concluindo que melhores resultados são obtidos para menores coeficientes de atrito entre a chapa e a matriz. Shawki apud Leu (1999), Venkatesh e Goh apud Leu (1999) e Verma e Chandra (2006) estudaram a influência da espessura da chapa no valor de LDR.

Basicamente os modos de falha de ferramentas para conformação a frio são: desgaste, lascamento, deformação plástica, trinca catastrófica e caldeamento. Sendo a escolha do material para a matriz dependente da severidade da operação e da produção. O Instituto Americano de Ferro e Aço (“American Iron and Steel Institute – AISI”) estabeleceu nove categorias para os aços utilizados para a confecção de ferramentas e matrizes, sendo a categoria “D” indicada para aços ferramentas para trabalho a frio. O aço ABNT D6 é largamente empregado para esta finalidade, podendo atingir dureza entre 58 e 62 HRC após o tratamento térmico de têmpera e revenido. Os altos teores de carbono e cromo (2% e 12,5%, respectivamente) resultam em elevada resistência ao desgaste (associada à presença de carbonetos de cromo) e baixíssima distorção no tratamento térmico (Silva e Mei, 1988). Ainda segundo os mesmos autores, o aço ABNT D6 é empregado na fabricação de matrizes para corte, estampagem e embutimento, punções de alta solitação, facas para tesouras de alto rendimento, pentes para laminação de roscas, fieiras para trefilação, fresas, brochas, moldes para prensagem de cerâmicos, ferramentas para prensas de extrusão, facas para corte de chapas siliciosas.

As matrizes e os moldes estão presentes nos processos de estampagem, forjamento, corte, dobra, fundição, injeção e etc., sendo seus fabricantes levados à incessante busca pela máxima qualidade com os menores custos e prazos. O fabricante deverá selecionar os meios disponíveis e a seqüência mais adequada para a confecção da matriz pretendida. Altan et al (1999) apresentaram alguns dos processos disponíveis para a fabricação de matrizes, sendo os principais: usinagem manual, usinagem em fresas copiadoras ou tornos copiadores, usinagem com comando numérico, eletroerosão e cravação.

2. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CONJUNTO

O projeto do ferramental para o Teste de Swift foi realizado com o auxílio de um *software* comercial de projeto e engenharia. A máquina universal de ensaios utilizada para a realização dos ensaios possui capacidade de 100 kN e

precisão da medição de força é de $\pm 0,3\%$. O mecanismo de operação é servoeletrônico, fornecendo via *software* os valores de força e deslocamento.

A ferramenta foi desenvolvida visando a otimização do processo de montagem/desmontagem na máquina universal de ensaios, bem como a operação, custo e facilidade de fabricação. A principal restrição encontrada foi a carga máxima que pode ser exercida pela máquina de ensaios universal, o que limitou a espessura máxima da chapa a ser estampada. Considerando um aço para estampagem extra profunda (EEP), cuja tensão última é de aproximadamente 280 MPa, tem-se uma espessura máxima a ser estampada de 2,30 mm. Por conveniência, os testes para a verificação do funcionamento do ferramental foram realizados com uma chapa de aço EEP com 0,60 mm de espessura.

Visando redução de custo e tempo de fabricação das ferramentas, optou-se pela utilização de peças padronizadas disponíveis comercialmente. O conjunto possui três bases, sendo a espessura da placa da matriz de 39 mm e as demais de 30 mm. Ao todo foram utilizadas oito buchas, sendo as do prensa-chapa do tipo curta e as do punção, normais. Um sistema de engate rápido foi adotado para a fixação da placa do punção na máquina universal, permitindo maior agilidade na montagem/desmontagem. A Figura 1 apresenta o projeto final da ferramenta para o Teste de Swift.

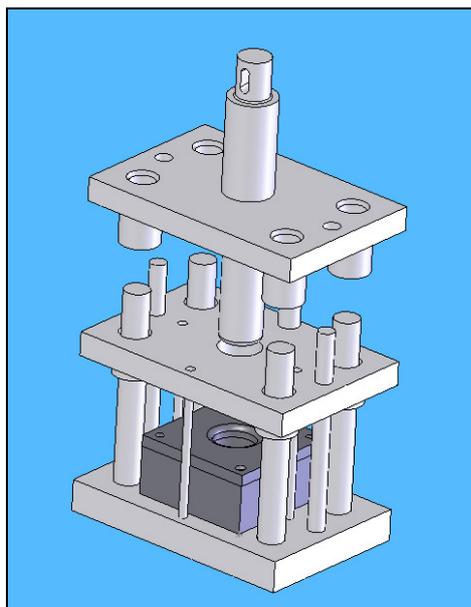


Figura 1. Projeto final para a ferramenta de estampagem (dimensões da base: 300 x 200 mm).

O prensa chapa foi desenvolvido de forma que o mesmo pode ser do tipo independente acionado por molas ou fixo, possibilitando que trabalhos futuros investiguem a influência do tipo do prensa-chapa no processo de estampagem. No presente trabalho, como pode ser visto na Figura 2, todos os ensaios foram realizados com o prensa-chapa funcionando de forma independente e acionado por quatro molas com constante elástica de 374,4 N/mm, diâmetro externo de 25 mm, diâmetro interno de 12,5 mm e comprimento inicial de 32 mm. Essas molas são reguladas por parafusos.

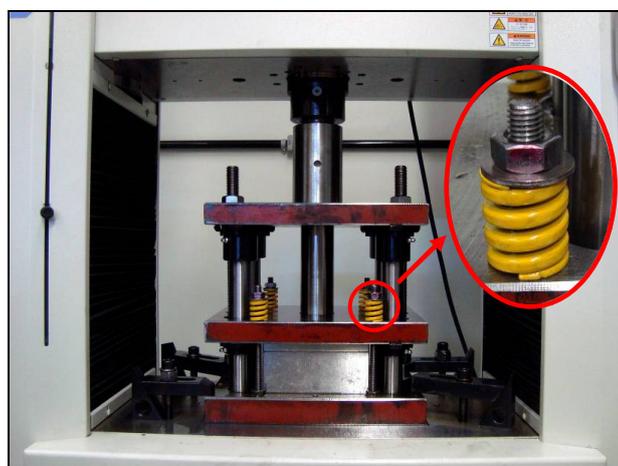
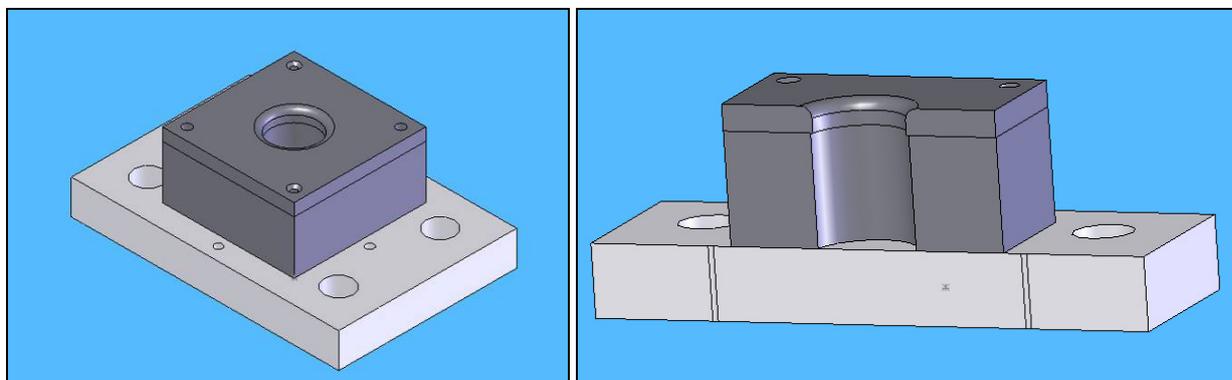


Figura 2. Detalhe da regulagem das molas do prensa chapa.

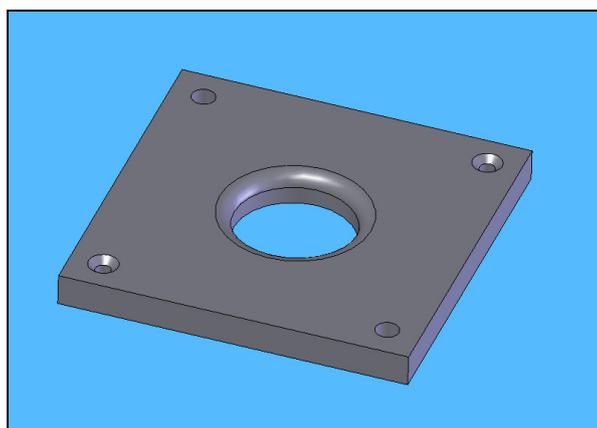
A matriz é fixada na placa de base e é composta por dois elementos. A primeira parte é um prolongador que permite o deslocamento do punção para o interior da matriz e a segunda parte é a matriz propriamente dita, responsável

pela geometria final da peça. Esta forma construtiva permite a redução do custo para a substituição da matriz, uma vez que o prolongador é sempre o mesmo. A Figura 3 apresenta o conjunto da matriz fixado na base, bem como o prolongado e a matriz. O alinhamento da matriz com o prolongador é feito com o auxílio de dois pinos guias. A fixação é realizada por intermédio de dois parafusos. O punção e a matriz foram fabricados em aço ABNT D6 e o prolongador em aço ABNT 1045. O prolongador da matriz, o punção e o engate rápido foram feitos através do processo de torneamento. As placas de base da matriz, prensa chapa e de fixação do punção foram fresadas. A superfície do prensa chapa que fica em contato com a chapa, bem como a matriz, foram cuidadosamente polidas. A Figura 4 apresenta algumas fotos obtidas durante o processo de fabricação do ferramental.



(a) Matriz montada sobre a base

(b) Vista em corte da matriz montada



(c) Matriz (dimensões: 148 x 148 x 10 mm)

Figura 3. Conjunto da matriz.

3. ENSAIOS DE VALIDAÇÃO

Os ensaios de estampagem foram realizados na máquina de ensaios universal mediante a montagem da ferramenta desenvolvida especialmente para a realização do Teste de Swift. Os blanques utilizados nos ensaios foram previamente cortados a *laser* a partir de chapas de aço EEP com espessura de 0,60 mm. Ensaio preliminares foram realizados para a determinação da menor força exercida pelo prensa-chapa a fim de evitar o enrugamento dos corpos de prova. Um valor de força máxima de 4500N foi encontrado e aplicado para todos os testes posteriores. As seguintes etapas foram cumpridas durante a realização dos Testes de Swift:

- a) Limpeza do blanque a ser estampado;
- b) Lubrificação da matriz e do prensa-chapa;
- c) Limpeza do punção (retirada de possíveis resquícios de óleo lubrificante);
- d) Posicionamento do blanque;
- e) Ajuste da força exercida pelo prensa-chapa;
- f) Realização do ensaio;
- g) Retirada da peça estampada;
- h) Exportação dos valores de força e deslocamento.



(a) Torneamento do punção

(b) Torneamento da matriz



(c) Furação do prolongador da matriz

(d) Punção e matriz montados

Figura 4. Etapas de fabricação da ferramenta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta alguns copos gerados durante os ensaios preliminares. O maior diâmetro de blanche estampado com sucesso foi de 109 mm, gerando um LDR de $2,17 \pm 0,02$, sendo o erro proveniente da variação de 1 mm entre os blanques testados. Os rompimentos, como podem ser vistos na Figura 6, ocorreram sempre no raio de canto do punção.



Figura 5. Corpos de prova gerados em ensaios preliminares.

A máquina universal de ensaios também fornece os valores de deslocamento e força, permitindo a análise do comportamento durante o teste de Swift e entre os testes realizados para diferentes diâmetros de blanche. O gráfico da Figura 7 ilustra o comportamento da força de estampagem para quatro diâmetros distintos de blanche, durante os quais não houve o rompimento da chapa. Durante os ensaios foi comprovado que quanto maior o diâmetro inicial do blanche, maior é a força de estampagem. Isto se deve ao fato de que uma maior parte do material está presa entre o prensa-chapa e a matriz, dificultando o início da deformação plástica da região da aba.

O gráfico ilustrado na Figura 8 apresenta o comportamento da força de estampagem para os casos em que houve rompimento do corpo de prova. É evidente que o aumento do diâmetro do blanque dificulta a transição da primeira para a segunda fase de estampagem, tornando as falhas mais precoces.

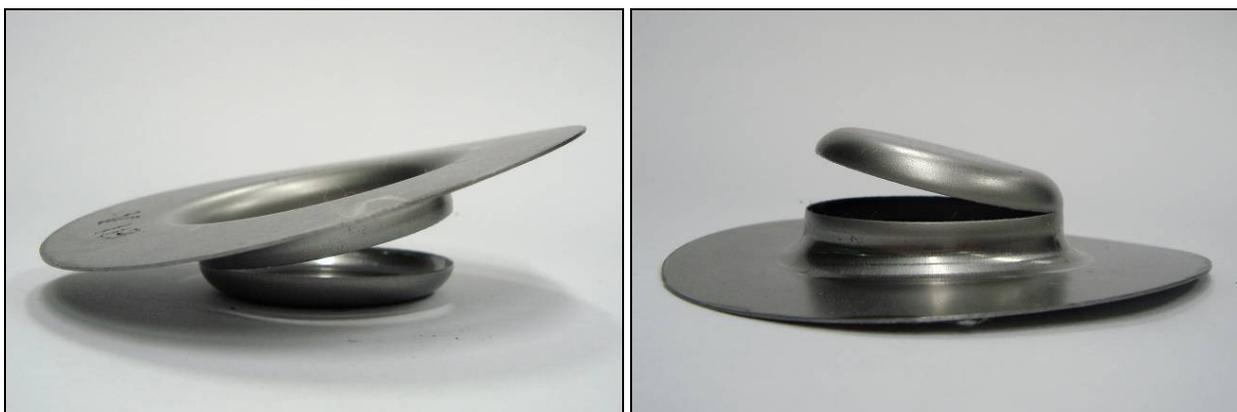


Figura 6. Rompimento do corpo de prova.

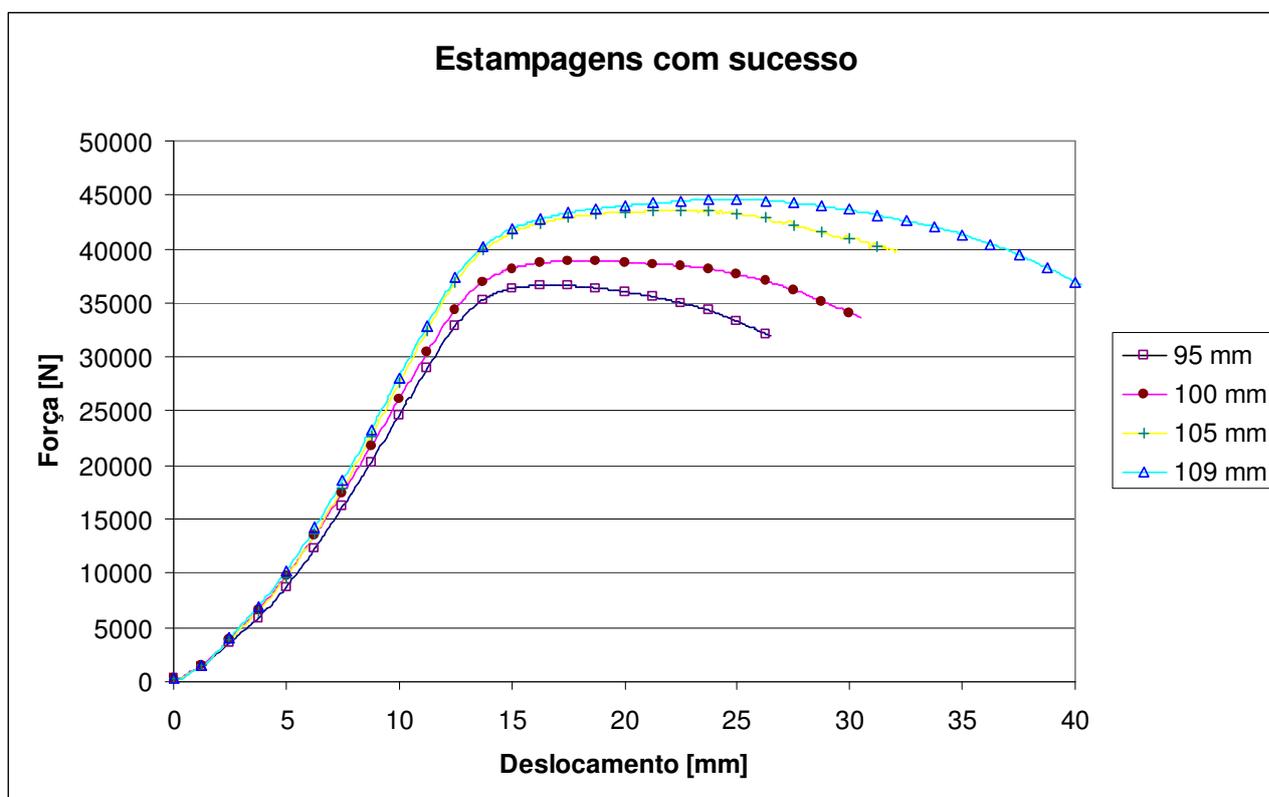


Figura 7. Força de estampagem versus deslocamento para ensaios de estampagem sem rompimento.

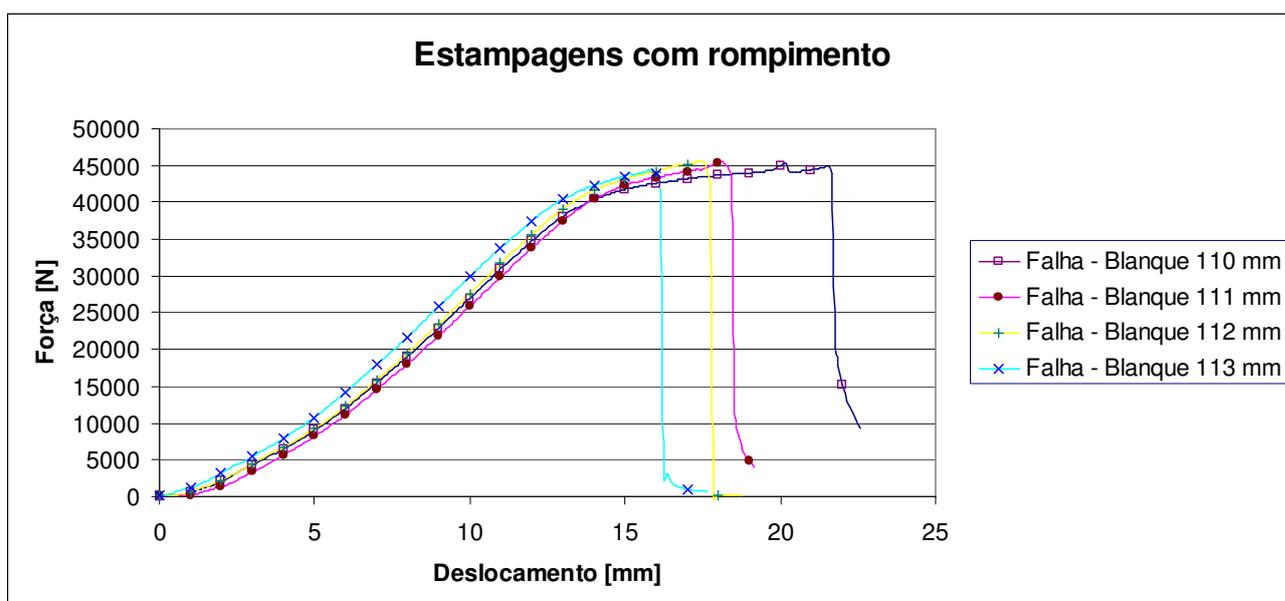


Figura 8. Força de estampagem versus deslocamento para ensaios de estampagem com rompimento.

5. CONCLUSÃO

O projeto e a fabricação do ferramental para a realização do Teste de Swift para a máquina universal de ensaios foram concluídos com êxito. Além de possibilitar a determinação do “Limiting Drawing Ratio (LDR)”, gráficos de força de estampagem versus deslocamento foram gerados, permitindo comparações e uma melhor compreensão do processo.

A forma construtiva da matriz (com o prolongador) possibilita a troca rápida e de baixo custo da geometria da mesma, viabilizando a realização de trabalhos futuros para o estudo da influência da geometria da matriz no processo de estampagem. Com pequenas modificações é possível alterar a matriz e o punção para a realização do processo de corte.

Como o ferramental foi adaptado a um equipamento existente no laboratório, criou-se uma nova linha de pesquisa com baixo investimento. Espera-se que a ferramenta seja utilizada tanto para aulas de laboratório como para pesquisas na área de usinagem de matrizes e estampagem.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pela concessão de auxílio financeiro (processos TEC 281/06 e APQ 4748 6.01/07) e às empresas VR Ferramentaria e Kampmann do Brasil pelo apoio ao projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Altan, T., Oh, S. e Gegel, H., 1999, “Conformação de metais – fundamentos e aplicações”, EESC USP, São Carlos, SP, pp. 315-319
- Dieter, George E., 1984, “Workability testing techniques”, Carnes Publication Services, USA, pp. 135-193.
- Gavas, M. e Izciler, M., 2006, “Deep drawing with anti-lock braking system (ABS)”, Mechanism and Theory 41, pp. 1467-1476.
- Huang, You-Min e Chen, Jia-Wine, 1995, “Influence of the die arc on formability in cylindrical cup-drawing”, Journal of Material Processing Technology 55, pp. 360-369.
- Huang, You-Min e Chen, Jia-Wine, 1996, “Influence of the tool clearance in the cylindrical cup-drawing process”, Journal of Material Processing Technology 57, pp. 4-13.
- Huang, You-Min e Cheng, Jia-Wine, 1997, “Influence of lubricant on limitation of formability of cylindrical cup-drawing”, Journal of Material Processing Technology 63, pp. 77-82.
- Leu, Daw-Kwei, 1999, “The limiting drawing ratio for plastic instability of the cup-drawing process”, Journal of Material Processing Technology 86, pp. 168-176.
- Moshksar, M. M., Zamanian, A., 1997, “Optimization of the tool geometry in the deep drawing of aluminium”, Journal of Material Processing Technology 72, pp. 363-370.
- Rodrigues, J. e Martins, P., 2005, “Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica”, Volume 2 Aplicações industriais, Editora Escolar, Portugal, pp. 435-600.

- Silva, A.L.C., Mei, P.R., 1988, "Aços e Ligas Especiais", 2ª edição, Eletrometal S.A Metais Especiais, Sumaré, SP, pp.458-460.
- Verma, R. e Chandra, S., 2006, "An improved model for predicting limiting drawing ratio", Journal of Material Processing Technology 172, pp. 218-224.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR CONDUCTING THE SWIFT CUP TEST IN A UNIVERSAL TESTING MACHINE

Bruno Lopes Pinheiro, lussivo@gmail.com
Paulo César de Matos Rodrigues, paulocmr@ufmg.br
Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br

Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brazil.

***Abstract.** Deep drawing is a manufacturing process of great relevance with regard to the sheet deformation, with unique importance to the automotive, aerospace, food, appliances, etc. To ensure deep drawing performance, more information concerned with the sheet mechanical behavior is required and the Limiting Drawing Ratio (LDR) is one of the most used parameters for deep drawing. Among the various proposed tests, the most widely employed for deep drawing is the Swift Cup Test, owing to the fact that it allows simulating production conditions and ensuring that the variables of the test can be repeated. The principal aim of this work is the design and manufacturing of a device (die, punch and blank holder) that can be easily adapted to a universal testing machine, enabling the Swift Cup Test to be conducted. Tests on a extra deep drawing (EDD) steel with 0.60mm thick indicated a LDR of 2.17 ± 0.02 and a maximum drawing force of approximately 45kN.*

***Keywords:** Swift test, limiting drawing ratio, deep drawing, mechanical project and manufacturing process*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.