



## O ENSINO EM LABORATÓRIO DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DE METAIS

**Sérgio Tonini Button**

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia de Materiais

CP 6122

13083-970 - Campinas - SP

[sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)

***Resumo.** Neste trabalho apresentam-se as atividades práticas que vêm sendo desenvolvidas na disciplina de Laboratório de Processos de Fabricação do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Descrevem-se os objetivos de cada experiência e apresenta-se sua relação com a teoria previamente desenvolvida. São analisados aspectos relacionados com as experiências, como equipamento, ferramentas e sistema de aquisição de dados empregados. Também são apresentados resultados obtidos nesses ensaios que propõe-se auxiliem na aprendizagem dos principais processos empregados para a conformação plástica de metais.*

***Palavras-chave:** Ensino, engenharia, conformação, metais.*

### 1. INTRODUÇÃO

O ensino de conformação plástica dos metais no curso de graduação em Engenharia Mecânica reveste-se de grande importância pois aborda processos amplamente empregados na indústria de manufatura na qual respondem por etapas intermediárias ou finais de fabricação da grande maioria dos bens produzidos, como componentes para automóveis, para máquinas-ferramentas, para equipamentos e instalações industriais, ferramentas manuais e instrumentos cirúrgicos, elementos de fixação, recipientes, entre outros.

Uma das dificuldades em transmitir-se conceitos e informações sobre a conformação plástica refere-se à grande variedade de processos existentes associada a uma grande diversidade de materiais trabalhados e de produtos fabricados, que envolvem conhecimentos específicos fortemente relacionados à experiência adquirida industrialmente nas áreas de planejamento de processos e de produção.

Lange (1985) apresenta no capítulo 2 uma classificação dos processos de conformação de acordo com o estado de tensão predominante em cada um deles. Numa primeira divisão, definem-se cinco grupos: por compressão, por tração, combinados por tração e compressão, por flexão e por cisalhamento.

A partir desses cinco grupos principais são definidos dezessete sub-grupos relacionados aos processos em suas denominações primárias. Como exemplo, tem-se no grupo de tensões predominantemente compressivas: a laminação, o forjamento com matriz aberta, o forjamento em matriz fechada, a indentação e a extrusão.

Cada um desses dezessete sub-grupos é novamente dividido para conter as variações de cada processo. A princípio, Lange diferencia essas variações pelo aspecto geométrico do processo, que normalmente está associado à geometria do produto. Assim, a laminação apresenta três divisões (longitudinal, cruzada e lateral) que novamente sub-divididas resultam em seis variações do processo original de laminação.

Outro processo básico como a extrusão apresenta, após as diversas divisões, um conjunto de dezenove variações, diferenciando a extrusão livre de peças sólidas da extrusão hidrostática para frente de tubos, passando pela extrusão inversa de latas.

Se reunidas todas essas variações, atinge-se algo em torno de setenta processos distintos, somente considerando aspectos geométricos. Outros fatores como os materiais conformados, as dimensões dos produtos ou as temperaturas de trabalho poderiam ser considerados nessa ou em outras classificações, aumentando o número de processos e evidenciando ainda mais a complexidade verificada nessa área da manufatura de peças metálicas.

Em outra referência importante na área de conformação plástica, Altan et al. (1983) apresentam uma outra classificação em que a primeira divisão refere-se à matéria-prima trabalhada, distinguindo os processos que trabalham com volumes, como a extrusão, o forjamento, a laminação e a trefilação, daqueles que envolvem superfícies (principalmente chapas e folhas) como a estampagem, o dobramento e o corte.

Os processos de conformação são tão específicos e apresentam tantas particularidades que é comum encontrar-se livros e manuais escritos especialmente para um determinado processo como em Laue & Stenger (1981) para a extrusão contínua de perfis, Billigmann & Feldmann (1979) para a extrusão a frio e Metals Handbook (1989) para o forjamento.

Assim, no ensino desses processos deve-se aliar os conhecimentos teóricos sobre aspectos metalúrgicos e mecânicos com informações práticas relacionadas com a dinâmica dos processos, os equipamentos empregados e detalhes práticos que garantem a viabilidade dos processos e a qualidade dos produtos conformados.

## **2. A CONFORMAÇÃO PLÁSTICA NA UNICAMP**

A partir de 1.990, o curso de Engenharia Mecânica da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) teve um novo currículo implantado que vigora atualmente (UNICAMP, 1999) e apresenta na área de processos de fabricação uma série de disciplinas que envolvem desde o ensino da prática de oficina mecânica até o estudo de sistemas de manufatura flexíveis e automatizados, passando pelo ensino dos processos por usinagem, fundição, soldagem e conformação.

Os processos por conformação plástica são apresentados na disciplina teórica Conformação Mecânica que tem em sua ementa tópicos sobre classificação e descrição dos processos, sobre metalurgia mecânica (encruamento, recozimento, conformabilidade, textura e anisotropia) e sobre mecânica da conformação (teoria da plasticidade, tribologia e métodos de cálculo de tensões e deformações).

A bibliografia básica consiste em livros-textos como Bresciani et al. (1997), Dieter (1981) e Schey (1987). Para complementar a teoria vista nas aulas expositivas, os alunos realizam semestralmente uma visita técnica a uma indústria de grande porte no setor de conformação plástica.

Além de avaliados sobre a teoria apresentada nas aulas expositivas, os alunos apresentam um projeto relacionado ao processo de fabricação de uma peça metálica. Atualmente, todo o

acompanhamento das etapas do projeto para o forjamento a quente (Button, 1998), incluindo um roteiro e um exemplo de aplicação para fabricação de uma engrenagem, pode ser feito pela internet no endereço <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/graduacao/EM730/projeto.html>.

Como afirmado na introdução deste texto, a grande diversidade dos processos de conformação faz com que somente a apresentação de conceitos teóricos não seja suficiente para o aprendizado e a preparação do estudante de Engenharia Mecânica para as atividades industriais que ele irá defrontar em sua profissão. Há necessidade de envolvê-lo com a prática do processo, de modo que ele perceba algumas particularidades dos equipamentos, ferramentas e materiais normalmente empregados e comprove os conceitos teóricos envolvidos.

Assim, a teoria dos processos de conformação é complementada no curso da UNICAMP com aulas práticas experimentais contidas numa segunda disciplina: Laboratório de Processos de Fabricação que também envolve experiências sobre usinagem, fundição, soldagem e metrologia.

### **3. AS EXPERIÊNCIAS DE CONFORMAÇÃO NO LABORATÓRIO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

Segundo Johnson (1992) o ensino prático da conformação plástica tem outro aspecto extremamente importante quando se observa o grande desenvolvimento ocorrido nos últimos anos no campo da simulação numérica dos processos, destacando-se o método dos elementos finitos. De acordo com Johnson a crescente sofisticação dos métodos e programas disponíveis deve ser acompanhada por um aprendizado prático consistente que permita ao engenheiro atuar positivamente seja fornecendo dados adequados para o pré-processamento (condições iniciais de temperatura, velocidade e atrito e propriedades do material a conformar, entre outros), seja analisando os resultados obtidos em termos de distribuições de deformações, tensões e temperaturas no produto e nas ferramentas que permitam avaliar possíveis problemas durante o processo como por exemplo defeitos nas peças conformadas.

A simulação numérica não fornece por si só uma resposta definitiva sobre o processo analisado devido às incertezas relacionadas com o comportamento plástico dos materiais metálicos nas condições de processamento e também ao comportamento das interfaces material-ferramentas no que se refere ao atrito/lubrificação. A simulação possibilita a validação dos resultados da simulação numérica e normalmente é encontrada nos diversos trabalhos que tratam da análise de processos como os reunidos em Altan & Ahmetoglu (1996).

A simulação física em laboratório empregando materiais de modelamento exigem recursos relativamente menores no investimento em equipamentos e ferramentas, como apresentado por Pertence & Cetlin (1998) e permitem avaliar principalmente o escoamento do material durante o processo prevendo-se o surgimento de defeitos.

A partir dessas diversas constatações, propôs-se a realização de experiências de conformação que destacassem o aspecto da simulação física validando os métodos numéricos de simulação e que permitissem aos alunos executarem os experimentos manuseando ferramentas e acionando equipamentos, e finalmente, avaliarem os resultados obtidos.

#### **3.1 Ensaio de extrusão**

**Objetivo.** Os ensaios de extrusão têm por objetivo demonstrar conceitos teóricos relacionados com a extrusão direta de tarugos cilíndricos, relacionando os esforços de extrusão com variáveis como o ângulo de conicidade da matriz e a redução de área imposta, além de verificar-se a qualidade superficial dos produtos obtidos.

**Variáveis de processo.** A extrusão direta é influenciada por variáveis diversas como as propriedades do material a extrudar, o ângulo de trabalho da matriz, a geometria e as dimensões do produto, a redução de área e as condições de lubrificação.

A maior redução de área imposta causa uma maior deformação plástica elevando a força necessária para extrusão. Vários autores apresentaram expressões relacionando a força com a redução de área, como mostrado por Lange (1985) às páginas 15.12 e 15.13.

O efeito do ângulo de trabalho sobre a força de extrusão relaciona-se ao conceito das parcelas de energia envolvidas na passagem do material pelo cone da matriz, sendo a energia de deformação uniforme relacionada com a redução de área, a energia de atrito relativa ao trabalho para vencer as forças de atrito na interface matriz-tarugo e a energia redundante relacionada ao cisalhamento interno do material causado pela mudança na direção de escoamento ao longo do processo.

Avitzur (1963) desenvolveu um modelo analítico para descrever a extrusão direta de cilindros, obtendo a expressão a seguir:

$$F_{extr} = \sigma_0 \cdot A_i \left[ 2 \cdot f_\alpha \cdot \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha}{\sin(\alpha)^2} - \cot(\alpha) \right) + m \cdot \left( \cot(\alpha) \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) \cdot \frac{L}{R_f} \right) \right] \right] + \pi \cdot D_i \cdot h \cdot m \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

onde:

$$f_\alpha = \frac{1}{\sin(\alpha)^2} \cdot \left[ 1 - \cos(\alpha) \cdot \sqrt{1 - \frac{11}{12} \cdot \sin(\alpha)^2} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \cdot \ln \left[ \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cdot \cos(\alpha) + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \cdot \sin(\alpha)^2}} \right] \right]$$

$F_{extr}$  – força de extrusão

$\alpha$  - semi-ângulo de conicidade da matriz de extrusão

$\sigma_0$  – tensão de escoamento do material do tarugo

$D_i, R_i$  – diâmetro e raio inicial do tarugo

$R_f$  – diâmetro final do produto

$L$  – comprimento da região cilíndrica da matriz

$h$  – altura do tarugo em contato com o recipiente

$m$  – fator de atrito constante, entre 0 (deslizamento perfeito) e 1 (aderência total)

A partir dessa expressão pode-se determinar a força de extrusão, bem como calcular o ângulo ideal para a região de trabalho da matriz que corresponde à força mínima de extrusão.

Bresciani et al. (1997) apresentam curvas que representam o comportamento da força de extrusão em função do deslocamento do punção para diferentes condições de lubrificação na extrusão direta e na extrusão inversa.

Já a máxima redução de área possível na extrusão livre, ou seja, sem que haja contato do tarugo com o recipiente ( $h = 0$ ) é apresentada por Lange (1985) à página 15.23.

**Procedimento experimental.** Os ensaios de extrusão são conduzidos de modo a obter-se curvas de força de extrusão versus deslocamento do punção. As curvas são analisadas para verificar a influência da redução de área e do atrito sobre a força, bem como determinar o ângulo ideal para a matriz que fornece o valor mínimo de força.

São realizados ensaios de extrusão direta com tarugos de alumínio comercial (99,5% Al) com 12,7 mm de comprimento e 40 mm de altura, lubrificados com uma mistura de óleo

mineral e grafite. São empregadas cinco matrizes de extrusão com dimensões como mostradas na Fig. 1.

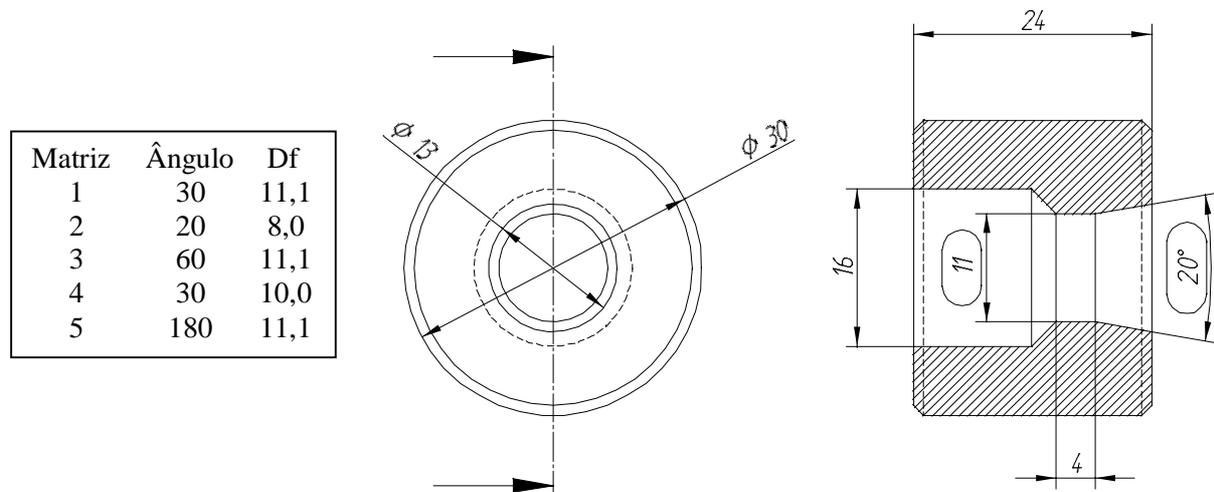


Figura 1 – Geometria e dimensões das matrizes de extrusão.

Os ensaios são realizados numa prensa hidráulica com capacidade de 300000 N. A força de extrusão é medida ao longo do processo por uma célula de carga extensométrica e os resultados são enviados a um microcomputador através de um sistema de aquisição de dados.

Com os resultados obtidos constróem-se curvas de força versus ângulo de cone das matrizes, comparando-as aos resultados obtidos para o processo com a expressão de Avitzur de modo a definir-se um valor adequado para o fator de atrito  $m$ .

**Apresentação e análise dos resultados.** A Fig. 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de extrusão para a força em função do deslocamento do punção. Primeiramente, observa-se a influência da redução de área que como esperado causa uma elevação da força necessária para a maior redução. O aspecto das curvas também confirma o comportamento esperado para a força em função da posição do punção.

Para as matrizes 1, 3 e 5 que apresentam menor redução (24%) observa-se que a força aumenta até o início da extrusão e posteriormente mantém-se constante até o final do processo, o que pode ser explicado pela ausência de atrito do tarugo com as paredes do recipiente visto que para essa redução a extrusão pode ser considerada livre, ou seja, a extrusão ocorre sem que haja recalque do tarugo.

Já para as matrizes 2 e 4, respectivamente com reduções de área de 60 e 38% a extrusão passa a ser confinada, ou seja, o recalque do tarugo ocupando o recipiente ocorre antes de iniciar-se a extrusão. Como pode ser verificado na Fig.2, após o aumento da força necessária para o preenchimento do recipiente, atinge-se um valor máximo quando inicia-se a extrusão e uma subsequente queda da força devida à redução do comprimento do tarugo em contato com as paredes do recipiente no decorrer do processo.

A figura 3 apresenta a curva de força de extrusão versus ângulo de conicidade da matriz. Os resultados experimentais apresentados referem-se aos valores mínimos de força encontrados para cada matriz, como na Fig. 2. Também, na Fig. 3 estão traçadas curvas obtidas a partir da expressão de Avitzur nas condições dos ensaios para vários valores de  $m$ . Nessa figura observa-se, novamente, a influência da redução de área no aumento da força, bem como a existência de um ângulo ideal para a matriz que minimiza a força de extrusão, no caso entre 15 a 18° para a solução numérica e próximo de 30° a partir dos resultados

experimentais. Da análise da Fig. 3 conclui-se que as condições de atrito no processo analisado são melhor representadas por um valor de  $m$  próximo a 0,4, que representa a interação da matriz de aço com o tarugo de alumínio, lubrificado com óleo e grafite.

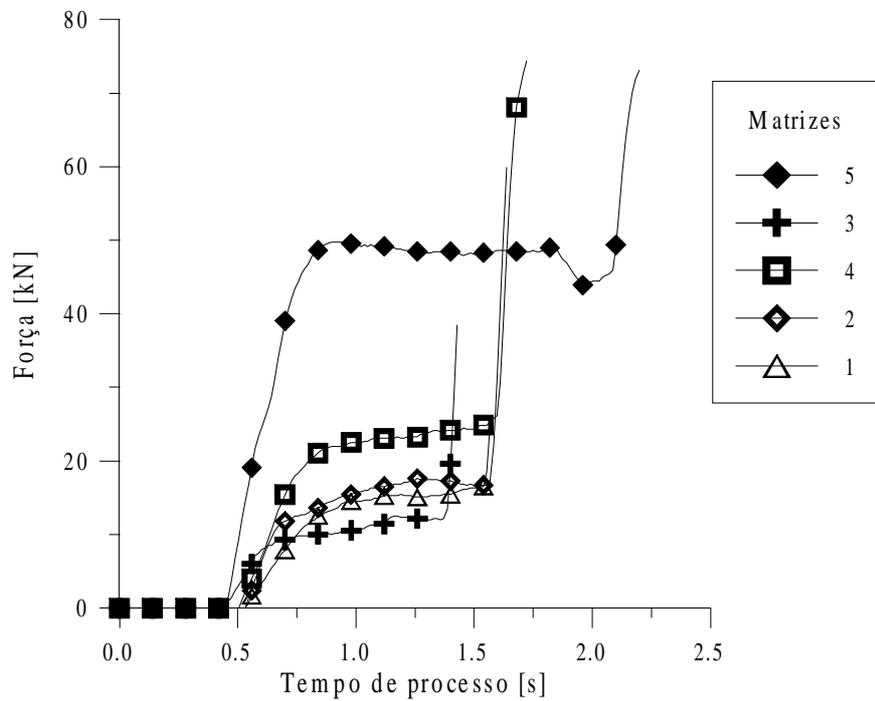


Figura 2 – Força de extrusão em função do deslocamento do punção.

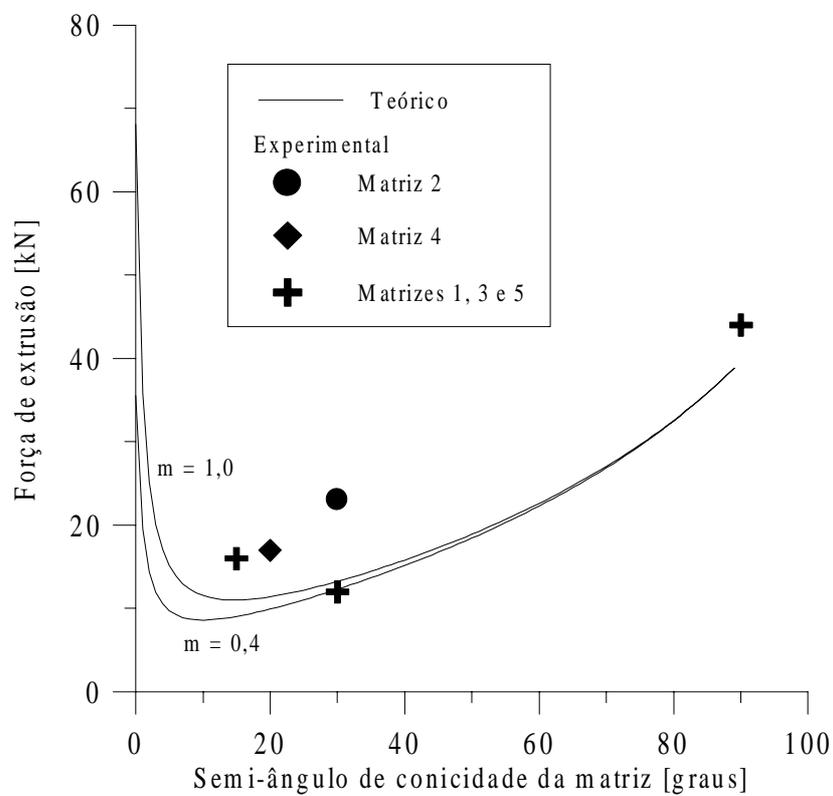


Figura 3 – Força de extrusão em função do ângulo de conicidade da matriz.

### 3.2 Ensaio de forjamento

**Objetivo.** Os ensaios de forjamento têm por objetivo estudar a influência da pré-forma na qualidade do produto forjado e na redução da quantidade de material na bacia de rebarba. Esses ensaios permitem também, avaliar a utilidade de materiais de modelamento, como o chumbo e a plasticina, na simulação de processos de conformação.

**Análise do processo.** O forjamento a quente em matriz fechada com formação de rebarba é um processo amplamente empregado na fabricação de componentes metálicos que devem apresentar elevada resistência mecânica. A formação de um bacia de rebarba garante o preenchimento adequado das matrizes; porém, apresenta-se desvantajoso economicamente pois causa a perda de uma quantidade significativa de matéria-prima que, em alguns casos, chega a representar 70% do volume inicial.

O processo estudado nos ensaios da disciplina é o forjamento de uma prótese femural apresentada na Fig. 4 (Caporalli, 1994). Como essa prótese é fabricada em liga de titânio que apresenta um custo elevado, a definição de uma pré-forma que minimize a rebarba é essencial para a viabilidade econômica do produto.

Convencionalmente, na indústria, parte-se de um tarugo cilíndrico que, após aquecido, é simplesmente dobrado e forjado com uma perda de material da ordem de 50% na rebarbação. Assim, o estudo proposto nos ensaios visa minimizar o volume do tarugo e definir uma forma que forneça produtos com qualidade e com desperdício mínimo de matéria-prima.

**Procedimento experimental.** São realizados três ensaios empregando as matrizes de forjamento apresentadas na Fig. 5.

Dispõe-se de três tarugos de chumbo comercial com massas próximas da peça acabada mostrada na Fig. 4. Os tarugos têm sua forma modificada manualmente de modo que, ao serem forjados numa só etapa, permitem a obtenção de produtos dentro das especificações apresentadas, ou seja, com as dimensões controladas e sem falhas de preenchimento.

Os tarugos são dobrados manualmente e o forjamento é realizado à temperatura ambiente numa prensa hidráulica com capacidade de 300.000 N.

São empregados, também, tarugos de plasticina com volumes semelhantes aos dos tarugos de chumbo, que apresentam trabalho manual facilitado e, também, permitem avaliar a influência das pré-formas na qualidade dos produtos.

**Apresentação e análise dos resultados.** A Figura 6 apresenta a geometria do tarugo, como empregada industrialmente, de um cilindro que posteriormente é dobrado e forjado (a) e da pré-forma encontrada como ideal (b), em que a peça apresenta três regiões com volumes próximos às respectivas regiões da peça forjada.

Com o tarugo (b) obtém-se uma redução de 32% de volume em relação ao tarugo (a), como pode-se observar na Fig. 7, já que a rebarba é concentrada nas regiões em que o escoamento é dificultado, principalmente junto à região da dobra. Como a rebarba é reduzida, a área projetada da peça forjada também é menor e, conseqüentemente, ocorre a redução da força necessária para fechamento das matrizes. Observa-se que a preparação da pré-forma é uma etapa importante pois, mesmo nas peças com excesso de material, nota-se que na região do ângulo da prótese há uma quantidade mínima de rebarba que pode levar à perda da peça por falha no preenchimento das matrizes.



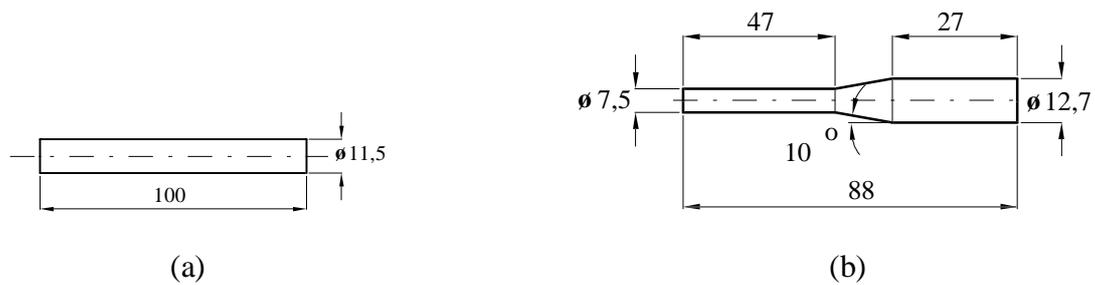


Figura 6 – Geometrias para os tarugos a forjar: (a) convencional, (b) otimizado.

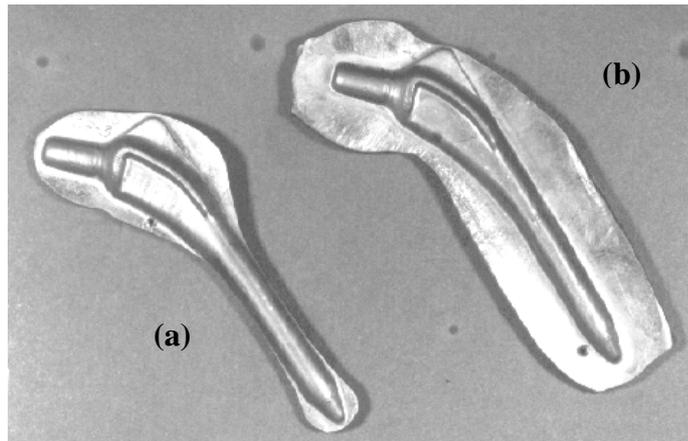


Figura 7 – Forjados obtidos com o tarugo otimizado (a) e com o convencional (b).

A Fig. 8 apresenta peças com rebarba reduzida forjadas a quente com alumínio comercial a 450 °C (a) (Caporalli, 1994), à temperatura ambiente com chumbo comercial (b), e com plasticina (c), a partir de tarugos com as mesmas dimensões e geometria (Fig. 6-b).

Pode-se observar que tanto o chumbo como a plasticina são materiais adequados para a simulação física do processo pois apresentam modo de escoamento semelhante ao do alumínio forjado a quente, o que permite avaliar-se a capacidade desse material preencher adequadamente as matrizes e fornecer produtos dentro das especificações.

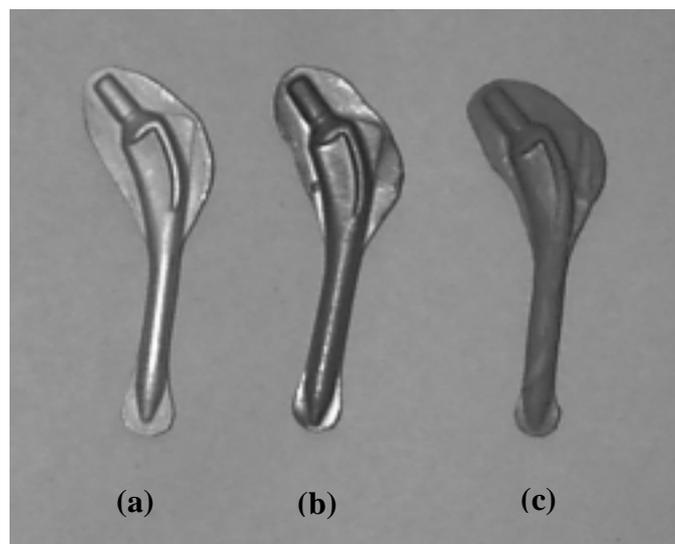


Figura 8 – Forjados a partir de tarugos de alumínio (a), chumbo (b) e plasticina (c).

#### 4. CONCLUSÕES

A realização de ensaios de simulação física de processos por conformação plástica de metais utilizando materiais de modelamento apresenta resultados interessantes para o aprendizado dos alunos de Engenharia Mecânica, que tomam contato com ferramentas e equipamentos empregados industrialmente e confirmam, com a prática experimental, alguns conceitos teóricos aprendidos sobre os processos.

Os resultados experimentais obtidos demonstram a utilidade desses ensaios que demandam o investimento de recursos relativamente reduzidos e permitem uma análise rápida e satisfatória de processos amplamente empregados como a extrusão e o forjamento.

#### REFERÊNCIAS

- Altan T, Ahmetoglu M., 1996, Special issue: selected papers on sheet forming and stamping and forging and machining, from the Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, Preface, Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, ns. 1 e 2.
- Altan, T., Oh, S.I. & Gegel, H.L., 1.983, Metal Forming, Fundamentals and Applications, American Society for Metals, Metals Park, Ohio,USA.
- Avitzur, B., 1963, Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of small cone angle, Journal of Eng. for Industry, Trans. ASME-B, vol. 85, pp. 89-96.
- Billigmann, J. & Feldmann, H.D., 1979, Estampado y Prensado a Máquina, Editorial Reverté S.A., Barcelona.
- Bresciani Fo., E., Button, S.T., Gomes, E., Nery, F.A.C. & Zavaglia, C.A.C., 1997, Conformação Plástica dos Metais, 5<sup>a</sup> ed., Ed. da UNICAMP, Campinas.
- Button, S.T., 1998, Roteiro para Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente, UNICAMP, Campinas.
- Caporalli Fo., A., 1994, Planejamento do processo isotérmico de forjamento de precisão de próteses femurais em liga de titânio, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Dieter, G.E., 1981, Metalurgia Mecânica, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Johnson, W., 1992, Developments in forming technology – an engineering educator’s approach, Journal of Materials Processing Technology, vol. 31, pp. 1-26.
- Lange, K. (Editor), 1985, Handbook of metal forming, McGraw-Hill Book Co.
- Laue, K. & Stenger, H., 1981, Extrusion, Processes, Machinery, Tooling, American Society for Metals, Metals Park, Ohio,USA.
- Metals Handbook, 1989, Forging, vol. 14, 9<sup>a</sup> ed., ASM International, Metals Park, Ohio,USA.
- UNICAMP, 1999, Catálogo dos cursos de graduação, Universidade Estadual de Campinas.
- Pertence, A.E.M. & Cetlin, P.R., 1998, Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming, J. of Materials Processing Technology, vol. 84, pp. 261-267.
- Schey, J.A., 1987, Introduction to Manufacturing Processes, 2<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill Intl.

#### **Experimental work in metal forming processes for engineering education**

**Abstract.** This work presents the experimental activities developed in the course “Manufacturing Processes Laboratory”, in the undergraduate program of Mechanical Engineering at UNICAMP. The objectives of each experiment are described and related to the theory which was previously presented to the students. Experimental aspects such as equipment, tools and data acquisition system are presented and analyzed. The results of the tests are showed and it is discussed how they can help in teaching metal forming processes.

**Keywords:** Education, engineering, metal forming