



UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA EXTRUSÃO DE UMA VÁLVULA AUTOMOTIVA

Antonio de Pádua Lima-Filho

Departamento de Engenharia Mecânica, Unesp-Ilha Solteira

Wyser José Yamakami

Departamento de Engenharia Mecânica, Unesp-Ilha Solteira

Anderson Brandão de Amorim

Departamento de Engenharia Mecânica, Unesp-Ilha Solteira

Resumo. *O objetivo deste trabalho é simular o fluxo do tarugo durante a extrusão de uma válvula automotiva. Plasticina e chumbo comercialmente puro foram usados como modelos para determinar o fluxo de material no interior da matriz. Esta análise demonstrou na prática as características de deformação do material na cavidade da matriz. A modelagem teórica aplicada foi validada através do tratamento experimental observado. A influência do meio lubrificante foi também estudado. Forças de extrusão medidas estavam em razoável acordo com as previsões utilizando métodos de energia para tarugos de chumbo e matriz bem lubrificadas.*

Palavras-chave: *Simulação, Extrusão, Elementos finitos, Atrito*

1. INTRODUÇÃO

Embora extrusão direta seja uma operação de conformação plástica muito comum, existem poucos trabalhos na literatura que forneçam uma caracterização experimental e teórica do processo para fabricar uma peça com geometrias relativamente complexas. Além disso, poucos resultados quantitativos da força de extrusão para diferentes condições de atrito são estudados. A caracterização teórica é feita através de uma modelagem matemática por software de elementos finitos existentes no mercado ou desenvolvidos. Assim, Kiuchi *et al.* (1996) aplicaram uma modelagem matemática usando elementos finitos (COPRESS) para prever defeitos geométricos, por exemplo, como a falta de homogeneidade do fluxo do metal dentro da cavidade da matriz em seção retangular e em ângulo (L) após a extrusão. Reinikainen *et al.* (1994) aplicaram e compararam dois programas de elementos finitos comercialmente disponíveis (DEFORM e FORGE 2) com resultados experimentais obtidos através da extrusão direta a frio de uma liga de Al-1,2% de Si-em peso para diferentes reduções em diâmetros. Outros como Pfindler e Caldwell (1996) têm desenvolvido um software de engenharia, para simulação de extrusão auxiliado por computador, denominado de 'CAE-Polyflow', visando prever a geometria da matriz a fim de obter a bitola final requerida do material extrudado. Um outro programa de computador, utilizando elementos

finitos, foi desenvolvido também por Yoshino e Shirakashi (1996) para simular extrusão direta, em forma cilíndrica, de materiais bimetálicos (*cladding*). Nesta simulação, introduziu-se o atrito e o mecanismo de soldagem a frio na interface dos materiais bimetálicos usados.

Aproximadamente três décadas atrás, Vickers *et al.* (1975) utilizaram plasticina, chumbo comercialmente puro e alumínio 6061T6 para simular a formação de cabeça através da operação de recalque axial. Modelos analíticos, alguns deles baseados na análise do limite inferior e superior, foram empregados por estes autores. Eles observaram que os resultados obtidos teoricamente estavam em razoável acordo com os resultados experimentais. O recalque axial feito por aquecimento localizado por resistência elétrica, é um processo utilizado para fabricar diversos tipos de válvulas usadas em motores de combustão interna. Mehta *et al.* (1970) acompanharam as linhas de escoamento na extrusão de tubos utilizando modelos malhados de chumbo comercialmente puro e uma liga eutética superplástica de chumbo e estanho. Eles observaram que os resultados experimentais e os obtidos com o modelamento teórico baseado no campo de linhas de velocidade estavam bem próximos.

Este trabalho descreve a aplicação de um programa de elementos finitos (ANSYS) para simular o processo de deformação do metal, na extrusão de uma válvula automotiva, utilizando chumbo para corresponder a extrusão a quente de uma válvula de aço. Evidentemente, o atrito do material sendo extrudado a quente é maior do que o extrudado a frio, o que refletiria na força de conformação para efeito de comparação. O perfil de deformação obtido para a válvula sendo extrudada em diversos estágios de deformação, é obtido através do uso de plasticina em camadas de 1mm e tarugos de chumbo com malhas, quadriculadas de 1mm², impressas em sua seção longitudinal. Estes resultados experimentais obtidos são comparados com a modelagem matemática utilizando elementos finitos através do ANSYS 5.3. Resultados são apresentados também em termos das pressões de extrusão obtidas com e sem lubrificação do ferramental, os quais são comparados com o método teórico da energia de deformação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Tarugos de chumbo comercialmente puro de 33-34 mm de diâmetro e 12mm de altura foram utilizados neste experimento. Eles foram obtidos após o vazamento do chumbo a 450°C, aproximadamente, numa lingoteira cilíndrica de 120mm de altura por 35 mm diâmetro em média, a qual foi pintada com um desmoldante grafitado. Após a fundição do lingote, o mesmo foi usinado longitudinalmente em torno de 33-34 mm de diâmetro e depois cortado em pedaços de 12 mm de altura aproximadamente.

Os experimentos de extrusão foram feitos numa prensa hidráulica de laboratório, marca Heckert, com capacidade de 980,7 kN (100 tf) (Figura 1). A medição das cargas e deformações foi possível através do uso, respectivamente, de uma célula de carga com capacidade de 490,4 kN (50 tf) e um relógio comparador com curso de 30mm e precisão de 0,01 mm. A coleta de dados das cargas foi feita através de um aparelho condicionador de sinais (TMDE), marca Transdutec. Uma pré-carga de 6 kN foi aplicada e, a partir daí, a carga foi aumentada manualmente de 9,8 kN (1 tf) em 9,8 kN (1 tf) tomando-se a leitura no relógio comparador até à carga máxima. A partir deste ponto, então, as medidas para as cargas de extrusão foram obtidas em função do deslocamento do punção de 0,5 em 0,5 mm, lidos no relógio comparador (Mitutoyo 0,01 a 30 mm). Para analisar a influência da lubrificação no processo de extrusão, foram ensaiados três corpos de prova para cada uma das três condições de lubrificação: à base de graxa grafitada (graxa mineral lubrificante e grafite), óleo lubrificante (SAE 30) e sem lubrificação. Fig. 2 mostra o desenho do ferramental usado no experimento.

Três tarugos (*billets*) de chumbo bipartido foram malhados, em quadriculados de 1mm², através de um graminho Mitutoyo (0,02 mm a 500mm), para acompanhar o fluxo de

escoamento do metal sendo extrudado. Um conjunto bipartido de matriz, container e punção foi projetado e usinado em acrílico para ensaiar tarugos preparados com plasticina em camadas de 1mm até a altura de 12 mm. O ferramental em acrílico foi feito bipartido para facilitar a extração da plasticina extrudada. Estes modelos (tarugo de chumbo malhado e plasticina) foram usados para fazer a comparação com os resultados obtidos na simulação teórica usando o ANSYS 5.3 (pacote de elementos finitos).

Uma curva tensão-deformação verdadeira foi obtida na prensa hidráulica de laboratório marca Heckert de 980,7 kN, usando tarugos de chumbo cilíndricos de 25,4 mm de diâmetro por 25,4mm de altura. Graxa grafitada como elemento lubrificante nos pontos de contato entre o material e os cabeçotes da máquina foi usada. O relógio comparador, como acima especificado, foi usado para acompanhar a redução na altura do material sob compressão. Uma pré-carga de 1 kN foi aplicada e, a partir daí, a carga de compressão foi aumentada, manualmente, para produzir um deslocamento de 0,1 mm em 0,1 mm até 1,5 mm de redução. A partir desse ponto, um deslocamento de 0,5 mm em 0,5mm foi aplicado até uma redução de 10mm na altura do corpo de prova.



Figura 1. Fotografia do experimento de extrusão mostrando a prensa de laboratório (Heckert) de 980,7 kN (100 tf) de capacidade, o medidor de aquisição de sinais TMDE (a) e a localização do relógio comparador (b). O fundo de escala usado na prensa Heckert foi de 392,

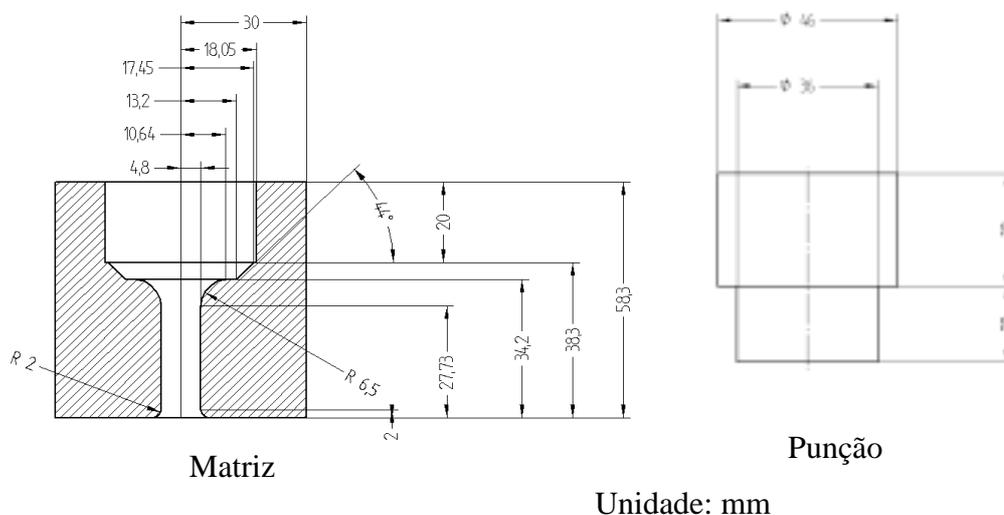


Figura 2. Desenho mostrando a geometria e as dimensões do ferramental usado no experimento deste trabalho.

3. MÉTODO DE ANÁLISE

O ANSYS, programa de elementos finitos, foi originalmente projetado para simular problemas de Mecânica dos Sólidos. Atualmente, novas versões do ANSYS possibilitam a aplicação em outras áreas de pesquisa, como por exemplo, transferência de calor, mecânica dos fluidos e conformação plástica dos metais. Assim, Campos Silva (1998) utilizou o ANSYS 5.2 para gerar malhas as quais, aplicadas em um outro programa desenvolvido por ele, serviram para simular escoamento em fluidos. Lima Roque (1996) e Bortulussi (1996) aplicaram o ANSYS 5.2 para simular, respectivamente, o forjamento a frio e processo de estampagem profunda. Por outro lado, o DEFORM é um pacote de elementos finitos especialmente projetado para simular operações de deformação plástica. Entretanto, Reinikainen *et al.* (1994) citam que o DEFORM pode ser usado para estudar também as deflexões elásticas e problemas de transferência de calor.

O ANSYS 5.3 é um programa de elementos finitos que utiliza o método iterativo de Newton Raphson para obter soluções de equações algébricas não lineares como as geradas durante a análise da deformação plástica do chumbo comercialmente puro neste trabalho. Na simulação, o material deformado foi considerado homogêneo, contínuo, isotrópico e com características de comportamento elasto-plástico com encruamento multilinear. Estas hipóteses foram adotadas para simular o fluxo de material na cavidade do ferramental (matriz e punção) o qual foi considerado rígido. Assim, um modelo linear foi adotado nos materiais utilizados no ferramental, e para o tarugo (*billet*) um modelo não linear-multilinear isotrópico.

Os pontos da Tabela 1 foram obtidos do ensaio de compressão de dois corpos de prova cilíndrico (25,4 mm diâmetro e 25,4 mm de altura) feitos de barras de chumbo fundidas, com pureza comercial. As dimensões desses corpos de prova foram baseados no trabalho de Vickers *et al.* (1975), os quais, também obtiveram uma curva tensão deformação para barras de chumbo extrudadas. Estes pontos foram introduzidos no arquivo de entrada para a simulação teórica. O primeiro ponto da Tabela 1, corresponde ao final da fase linear do ensaio de compressão e os demais pontos se encontram no trecho onde ocorre deformação plástica no material. A curva de escoamento obtida do ensaio de compressão pode ser representada através da seguinte equação:

$$\bar{\sigma} = 41,3\bar{\epsilon}^{0,2} \text{ [MPa]}. \quad (1)$$

Tabela 1. Pontos obtidos na curva tensão-deformação verdadeira para chumbo comercialmente puro.

Tensão verdadeira (σ) (MPa)	Deformação verdadeira (ϵ) (10^{-3})
6,2	0,5
9,1	3,9
12,3	7,9
15,5	11,9
19,2	19,9
21,4	27,9
22,9	36,1
24,5	48,4
27,7	103,6
31,1	195,0
33,3	295,6
36,5	500,4

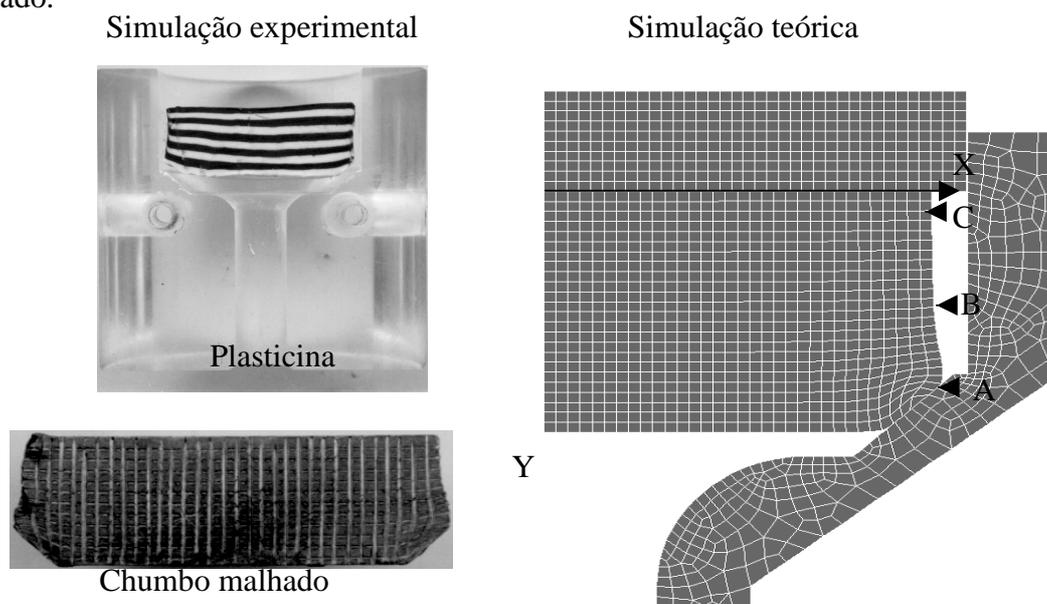
As condições de contato entre o tarugo, matriz e punção foram definidas através do modelo de Coulomb. O fator de atrito adotado na modelagem foi de 0,10 (Schey, 1983). Os valores adotados para a rigidez de contato, de aderência e a tolerância para o vetor força foram alterados durante a etapa de simulação de forma a garantir a convergência da solução.

As dimensões adotadas para o tarugo na simulação foram de 34,0 mm de diâmetro por 12,0 mm de altura. A geração da malha no mesmo foi feita através de linhas horizontais e verticais, como as impressas nos corpos de prova ensaiados. Esta malha tem o mesmo refinamento em toda zona de deformação, à qual consistiu de 768 elementos interconectados a 713 pontos nodais.

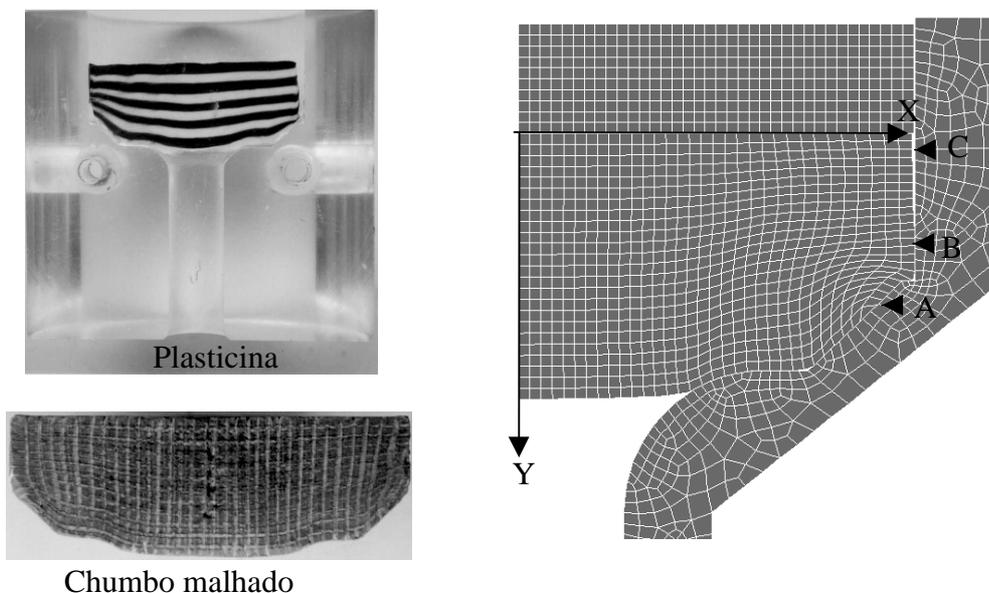
4. RESULTADOS E DISCUSÃO

Fig. 3 compara qualitativamente a distribuição das linhas de deformação obtidas no ANSYS 5.3, no tarugo malhado e na plasticina, para o produto parcialmente extrudado. Observa-se na Fig. 3, para ambos os modelamentos (teórico e experimental), que a deformação não é uniforme; e a mais severa deformação, por exemplo, está concentrada nas áreas de contato entre o chumbo e o ferramental nas regiões inclinadas da matriz. Isto está de acordo com o trabalho de Reinikainen *et al.* (1994) na extrusão a frio de um tarugo cilíndrico feito de Al-1,2% de Si (em peso), os quais empregaram o programa de elementos finitos DEFORM na simulação. Reinikainen *et al.* (1994) citaram que os resultados encontrados estão também de acordo com aqueles obtidos no FORGE 2, aplicado por Welo *et al.* (1992). Na prática, uma deformação não uniforme é indesejada, pois causaria um entalhe metalográfico na peça após passar pela região de recristalização, a qual é delimitada pelas temperaturas homólogas de 0,3 a 0,5 (Kalpakjian, 1997). Este entalhe é explicado pela formação de uma granulação grosseira no centro da peça (região menos deformada) e de uma granulação fina obtida na periferia da peça (região altamente deformada).

Como observado na Fig. 3 (a) e (b), as distorções da malha no modelo teórico e experimental estão bem próximas e assim podem representar o fluxo de material. Realmente, durante o recalçamento (formação da cabeça da válvula) as malhas localizadas no centro deste modelos não sofrem deformação, somente as malhas da periferia (Figura 3 (b)). Isto demonstra que o atrito aumenta da periferia para o centro na interface punção/matriz como esperado.



(a) Plasticina, tarugo de chumbo e simulação teórica. O material sofre preferencialmente recalque e preenche a região de concordância entre a cabeça e a haste da válvula.
Deslocamento do punção: 2 mm.



(b) Após o recalque, ocorre uma extrusão direta, para formar a haste da válvula.
Deslocamento do punção: 4mm.

Figura 3. Comparação dos resultados obtidos via simulação experimental (chumbo malhado em 1 mm x 1 mm e plasticina) e teórica (ANSYS 5.3).

Observa-se uma boa aproximação do modelo teórico em relação aos resultados experimentais obtidos para o chumbo e plasticina (Fig. 3 (a) e (b)). As medidas foram feitas no microscópio CARL ZEIS-JENA com ajuda de uma mesa móvel de 0,01 mm a 40 mm num aumento de 1,6 vezes.

Uma avaliação quantitativa foi realizada determinando-se as coordenadas X e Y de alguns nós (A, B e C) do modelo teórico nas Figs. 3 (a) e (b) para deslocamentos de 2 e 4 mm, respectivamente. As coordenadas X e Y destes pontos foram comparados com os respectivos pontos sobre a malha impressa nos corpos de prova submetidos ao ensaio de extrusão, para o mesmo deslocamento do punção. Tabela 2 mostra os deslocamentos dos pontos medidos nos modelos teórico e experimental. Como se observa nesta tabela, o desvio é pequeno. Isto demonstra que o modelo representa bem o processo experimental.

Tabela 2. Comparação do deslocamento de alguns nós no modelo teórico (T) e experimental (R).

Deslocamento do punção (mm)	Ponto A				Ponto B				Ponto C			
	X		Y		X		Y		X		Y	
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T
2	15,9	16,5	9,5	10,3	17,5	16,6	6,0	6,8	16,8	16,4	1,0	1,0
4	17,2	16,5	7,7	8,1	18,2	18,0	5,6	5,4	18,1	17,9	1,0	0,8

O gráfico da carga de extrusão em função do deslocamento do punção, obtido pela média dos três tarugos lubrificadas (graxa grafitada e óleo lubrificante) e não lubrificadas, pode ser dividido em quatro regiões (Figura 4).

• **Região I**

Não há praticamente diferença entre os perfis da curva de extrusão até 3 mm de deslocamento do punção para as condições de ensaio, i.e. tarugos com e sem lubrificação. Até esse ponto,

não ocorre o início da extrusão da haste da válvula, i.e. somente o recalçamento necessário para o preenchimento do container e partes inclinadas da matriz (veja Figura 3 (a) e (b)). Então, aparentemente o lubrificante empregado na fase de recalçamento até 50 kN não age para reduzir a carga de extrusão.

- **Região II**

Em torno de 4 mm de deslocamento do punção ocorre um aumento acentuado da força de extrusão para todas as condições de ensaio. A partir desse deslocamento, ocorre a formação da haste da válvula. Verifica-se uma menor força de extrusão somente para óleo lubrificante. Assim, o coeficiente de atrito na interface ferramental/chumbo, empregando esse lubrificante, é menor. Por outro lado, o perfil da curva carga de extrusão sem lubrificante e com graxa grafitada é praticamente igual até 4,7 mm de deslocamento do punção para uma carga de 170 kN aproximadamente.

- **Região III**

A partir de 170kN a graxa grafitada atua como lubrificante fazendo com que as cargas sejam menores que as observadas para a extrusão sem lubrificante. Isto sugere que a partir de 4,7 mm de deslocamento do punção, inicia a formação de rebarba entre o punção e a parede do container. No intervalo entre 4,7 mm e 6 mm o óleo lubrificante apresenta menor coeficiente de atrito do que a graxa grafitada na formação da válvula. Entretanto, este valor se inverte a partir de 6 mm de deslocamento do punção, i.e. o valor da carga de extrusão para graxa grafitada cai abruptamente.

- **Região IV**

No estágio final de extrusão onde ocorre um aumento acentuado da geração de rebarba, o efeito lubrificante da graxa grafitada é melhor. Talvez, nesse estágio o aumento da temperatura do ferramental atinge um valor máximo deteriorando o efeito do óleo lubrificante. Realmente, Reinikainen *et al.* (1994) mostram que ocorreu um aumento de temperatura de 55°C na matriz quando um tarugo de 28,8 mm de diâmetro por 30 mm de altura sofreu uma redução de 19,5mm de diâmetro até o final do curso do punção.

A Tabela 3 compara as cargas e deslocamentos máximos e mínimos da curva de extrusão obtidos para as condições de ensaio (com e sem lubrificação). A carga teórica de extrusão calculada pelo método da energia, é mostrado também nessa tabela para efeito de comparação. Os valores da carga máxima de extrusão para tarugos lubrificados a óleo (209±86 kN) e graxa grafitada (210±63 kN) estão bem próximos. Por outro lado, uma diferença de 16% ocorre quando se compara a carga mínima de extrusão utilizando graxa grafitada (174±11 kN) com óleo lubrificante (202±81 kN). Isto pode ser devido à degeneração do óleo lubrificante ao final do processo, como discutido anteriormente. A carga de extrusão máxima e mínima para tarugos de chumbo ensaiados sem lubrificação é, respectivamente, em média, 16% e 34% maior em relação àquela medida nos tarugos utilizando graxa grafitada (menor carga de extrusão medida). Evidentemente, como esperado, a força de atrito faz aumentar o carregamento externo necessário para promover a deformação plástica no material.

Dieter (1988) aplica o método da energia na solução de problemas de conformação plástica dos metais. A carga de extrusão neste trabalho pode ser calculada através:

$$\bar{F} = CA_o \bar{\sigma}_o \ln \frac{D_o^2}{D_f^2}; \quad (2)$$

onde \bar{F} é a força teórica de extrusão, C o fator de correção de atrito (varia 1,3 a 1,6 de acordo com Dieter (1988) para operação de extrusão), A_o a área da cabeça da válvula, $\bar{\sigma}_o$ a tensão de escoamento do chumbo e D_f^2 o diâmetro final da válvula.

Fazendo-se uso da Eq. (1) e da geometria do ferramental (Figura 2), estima-se a força de extrusão através da Eq. (2), adotando um fator de correção de atrito (C) igual a 1,5:

$$\bar{F} = 1,5 \frac{\pi 36,1^2}{4} 50 \ln \frac{9,6^2}{36,1^2} \cong 202 \text{ kN}. \quad (3)$$

Este valor da carga de extrusão está bem próximo do valor experimental obtido para óleo lubrificante (Tabela 3). Usando um fator de correção (C) de 1,3 resulta num valor também bem próximo para graxa grafitada (Tabela 3). Assim, a carga de extrusão pode ser estimada com sucesso através da Eq. (2).

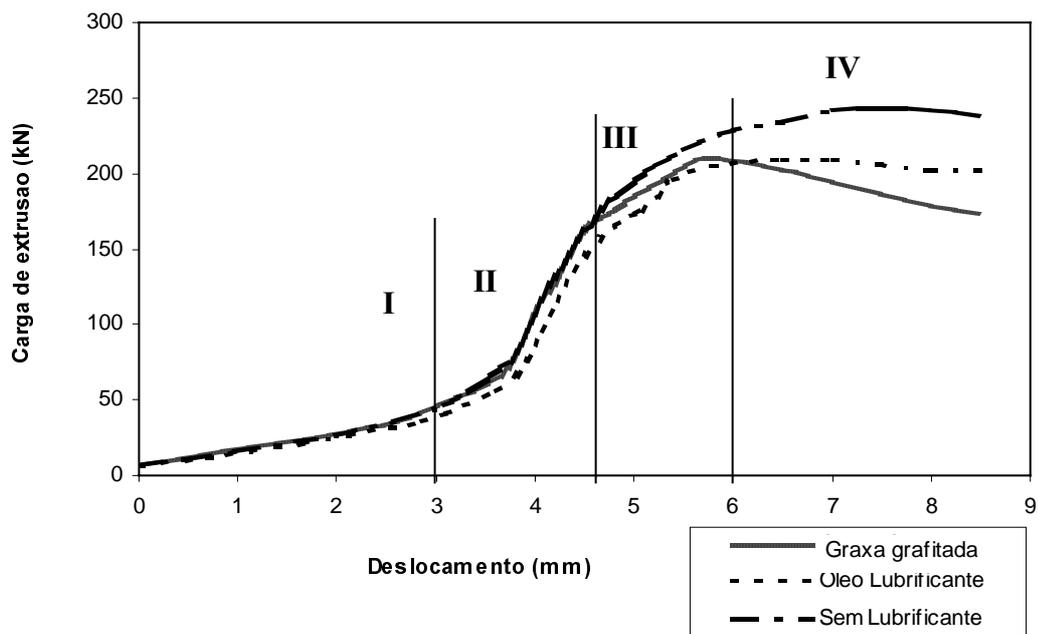


Figura 4. Curva de extrusão para tarugos de chumbo lubrificadas (graxa grafitada e óleo lubrificante) e sem lubrificação. Regiões I, II, III e IV mostram a mudança no perfil da curva de extrusão para as condições de ensaio como indicadas.

Tabela 3. Comparação das forças de extrusão calculada ($F_{calc.}$) e medida (\bar{F}_{ext}) para tarugos cilíndricos (12mm de altura por 33,5mm de diâmetro) de chumbo para uma redução no diâmetro final de 9.6mm (diâmetro da haste da válvula).

Veja curva de extrusão (Figura 4)	Sem lubrificação+		Óleo lubrificante+		Graxa grafitada *	
	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
Carga de extrusão kN (\bar{F}_{ext})	243±60	234±86	209±86	202±81	210±63	174±11
Deslocamento mm ($\bar{\Delta}l$)	7,5±0,1	8,5±0,1	7±0,1	8,5±0,1	5,8±0,1	8,5±0,1
Carga de extrusão calculada kN ($F_{calc.}$) (Eq. (3)) para C=1,5 e 1,3 respectivamente.	-	-	-	202	-	172

95% de confiabilidade; * Dois tarugos; + Três tarugos

Fig. 5 mostra as válvulas de chumbo extrudadas para as condições de ensaio, i.e. com e sem lubrificação. A peça extrudada utilizando graxa como lubrificante, apresentou aparentemente o pior acabamento superficial (Figura 5 (b)). Por outro lado, o acabamento superficial da válvula foi melhor, quando se extrudou tarugos sem lubrificação e com óleo lubrificantes, veja Fig. 5 (a) e (c) respectivamente. Isto é explicado pelo maior contato entre o tarugo e o ferramental durante a deformação plástica do material sendo extrudado.

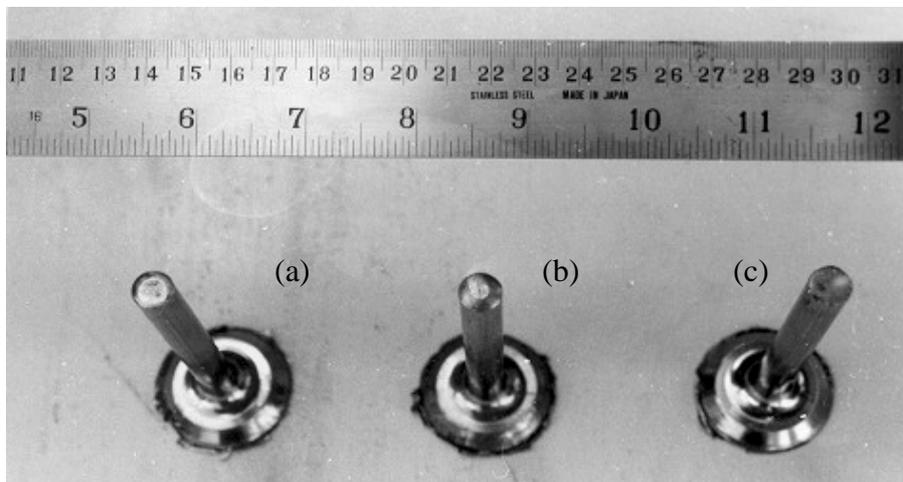


Figura 5. Válvulas extrudadas nas seguintes condições: (a) sem lubrificante, (b) graxa grafitada e óleo lubrificante.

5. CONCLUSÃO

O modelo teórico quando comparado com o modelo experimental mostrou uma boa aproximação. Assim, o fluxo de material, mostrado pela distorção da malha no chumbo, pode ser simulado pelo programa de elementos finitos empregado.

A carga de extrusão da válvula foi diminuída através dos lubrificantes empregados (graxa grafitada e óleo lubrificante). Uma maior eficiência foi obtida com o uso da graxa grafitada.

A medida da carga de extrusão para tarugos ensaiados com lubrificantes, mostrou resultados próximos ao estimado pelo método da energia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos técnico Darci Alves Ribeiro e Marino Teixeira Caetano (Departamento de Engenharia Mecânica), Mário Roberto Ferreira e Ronaldo Mendes do Amaral (Departamento de Engenharia Civil) da UNESP-Campus de Ilha Solteira, por auxiliar na parte experimental. Os autores também são muito gratos ao Sr. Euler Barreto Junior (técnico especialista em instalação e extensometria) por colaborar na calibração da célula de carga empregada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bortolussi, R., 1996, Simulação do processo de estampagem profunda de corpos cilíndricos através do método dos elementos finitos, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas.
- Campos Silva, J.B., 1998, Simulação numérica de escoamentos de fluidos pelo método de elementos finitos baseado em volumes de controle, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas.

- Dieter, E. G., 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, London.
- Kalpakjian, S., 1997, Manufacturing Processes for Engineering Materials, A. Wesley, California.
- Kiuchi, M., Yanagimoto, J. and Victor, M., 1996, Characterization of three-dimensional metal flow in extrusion process, CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 45, n. 1, pp. 235-238.
- Lima Roque, C.M.O., 1996, Aplicação do método dos elementos finitos no planejamento da sequência de forjamento a frio, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas.
- Mehta, H.S., Shabaik, A.H. and Kobayashi, S., 1970, Analysis of tube extrusion, Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, pp. 403-411.
- Pfendler, J. & Caldwell, C., 1996, Verification of a CAE extrusion simulation package with and actual profile extrusion die, Proceedings of the 1996 54th Annual Technical Conference, Indianapolis, vol. 3, pp. 3602-3604.
- Reinikainen, T., Welo, T., Korhonen, A.S. and Kivivuori, S., 1994, Comparison of two commercial FEM codes in cold extrusion simulation, Journal of Materials Processing Technology, vol. 42, pp. 137-146.
- Schey, J.A., 1983, Tribology in metal working: friction, lubrication and wear, Ohio, 750p.
- Vickers, G.W., Plumtree, A., Sowerby, R. and Duncan, J.L., 1975, Simulation of the Heading Process, Journal of Engineering Materials and Technology-Transaction of the ASME, pp. 126-135.
- Welo, T., Skjervold, S., Jensrud, O. and Pedersen, K., 1992, Cold forging and grain size control in an Al-1.2 wt% Si alloy, Journal of Materials Processes, vol. 34, p. 533.
- Yoshino, M. & Shirakashi, T., 1996, Numerical simulation of cladding process in bimetallic rod extrusion, Proceedings of the 1996 24th NAMRC Conference, Ann Arbor, vol. 6, 6p.

AN EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF AN AUTOMOTIVE VALVE EXTRUSION

Abstract. *The aim of this work is to simulate the billet flow during the extrusion of an automotive valve. Plasticine and commercially pure lead were used as experimental flow patterns to simulate extrusion process. These obtained patterns showed the internal flow of the material inside the die, which were very close with the applied theoretical models. Friction effect was also studied. Extrusion forces for lubricated lead billets were fair agreement with the estimated values by the uniform-deformation energy method.*

Key-words: *Extrusion, Simulation, Finite element methods, Friction.*