



DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO DE PROCESSO DE FORJAMENTO USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

César Antonio Aparicio

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Av. do Trabalhador Saocarlene, 400, CEP: 13566-590, São Carlos – SP.
e-mail: aparicio@sc.usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Av. do Trabalhador Saocarlene, 400, CEP: 13566-590, São Carlos – SP.
e-mail: rtcoelho@sc.usp.br

Celso Antonio Barbosa

Villares Metals S.A. - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
R. Alfredo Dumont Villares, 155, CEP: 13177-900, Sumaré – SP.
e-mail: celsoa@villares.com.br

Resumo: *A simulação de processos de conformação de metais é hoje uma realidade devido, em grande parte, a um melhor entendimento do comportamento de materiais e de processos, assim como, aos avanços tecnológicos na área de informática acontecidos nas duas últimas décadas que permitiram desenvolver e melhorar os programas de simulação. Através de simulação numérica o forjamento de um produto pode ser testado e analisado em diversas situações, o que representa economia por se tratar de teste não destrutivo. Contudo, os resultados obtidos em muitos casos divergem daqueles obtidos através de processos reais de conformação. Neste trabalho é apresentada a simulação do processo de forjamento de uma válvula de exaustão de motor de combustão interna utilizando programas de elementos finitos, onde foram introduzidas condições e propriedades reais tanto de processo como de materiais. Numa próxima etapa os resultados numéricos obtidos serão confrontados com os resultados práticos reais com o objetivo de validar as simulações.*

Palavras-chave: *Elementos finitos, forjamento, conformação de metais, válvula.*

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação dos materiais são um subgrupo dos processos de fabricação onde, o metal é conformado através de deformação plástica. São processos amplamente usados na manufatura de produtos devido a que usualmente melhoram as características mecânicas das peças além de garantirem precisão dimensional com pouco desperdício de material. Incluem-se entre estes processos os processos de conformação maciça como o forjamento, extrusão, laminação e trefilação; e processos de conformação de chapas como o dobramento, repuxo e estiramento.

Autores como ALTAN, et al. (1999), afirmam que a conformação é especialmente atrativa em casos em que: (a) a geometria dos componentes é moderadamente complexa e o volume de produção é grande, de maneira que o custo de ferramental por unidade produzida possa ser mantido baixo – por exemplo, em aplicações automobilísticas; e (b) as propriedades e integridade metalúrgica dos componentes são extremamente importantes, como no caso de aeronaves de carga, motores a jato e componentes de turbina.

1.1 Forjamento

O processo de forjamento é uma operação de manufatura onde um tarugo inicial é deformado plasticamente entre matrizes para obter uma forma final desejada. Este processo é capaz de produzir peças de qualidade garantindo ainda resistência – peso. Este processo pode ser realizado usando: (a) matrizes abertas (item 1.1.1) ou; (b) matrizes fechadas (item 1.1.2). As peças podem ser conformadas em várias faixas de temperatura, o que classifica o processo como sendo à frio, morno ou quente. Devido a que o fluxo de material é forçado pela pressão da matriz sobre o tarugo, o atrito na interface tarugo-matriz influencia diretamente o fluxo de material, formação de defeitos internos e superficiais na peça em conformação, assim como desgaste de matrizes.

1.1.1 Forjamento em matrizes abertas

É um processo de conformação a quente onde um tarugo é conformado através do movimento de matrizes entre si, as quais não formam uma cavidade fechada, Figura 1. Neste tipo de forjamento a forma do produto final depende de fatores como: geometria das matrizes, profundidade de passes, quantidade de passes e habilidade do operador. É um processo usado quando o número de peças a produzir é relativamente pequeno e o tamanho das mesmas é grande, outra característica deste processo é a capacidade de eliminar defeitos internos em peças de grande tamanho (eixos de turbinas e de navios, grandes virabrequins e anéis, entre outros).

1.1.2 Forjamento em matriz fechada

O processo de forjamento em matriz fechada consiste no movimento de duas ou mais matrizes entre si para conformar um tarugo metálico, à uma temperatura e forma (cavidade das matrizes) predeterminada (Figura 1). Este processo pode ser realizado a frio, a morno ou a quente para conformação de peças de tamanhos pequenos - em relação com as peças conformadas em matriz aberta. Boa qualidade superficial e tolerâncias dimensionais próximas das finais são o grande atrativo deste processo.

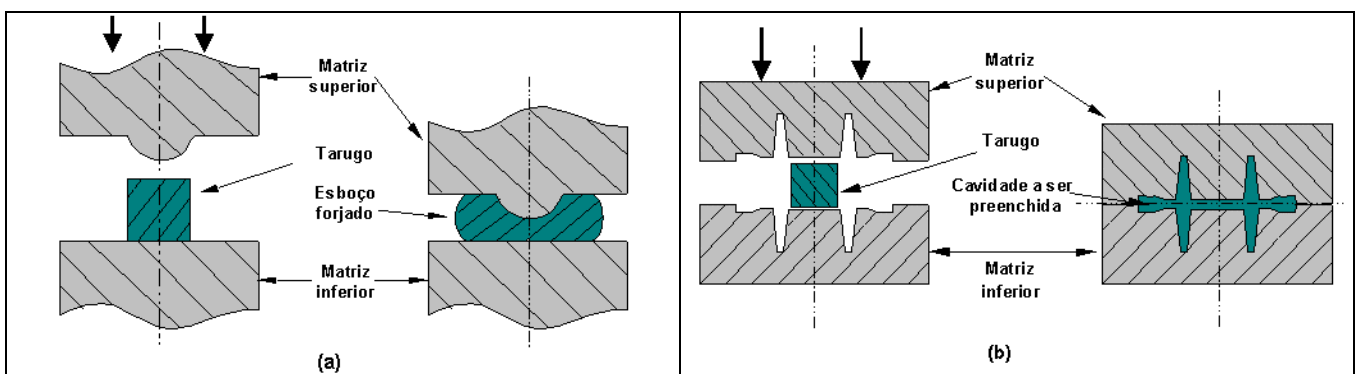


Figura 1: Processo de forjamento usando (a) matrizes abertas, (b) matrizes fechadas.

1.2 Método de elementos finitos

Prever o comportamento de materiais durante um determinado processo de fabricação não é uma tarefa simples. O projetista tem que procurar auxílio em ferramentas matemáticas para tal objetivo, contudo, estas ferramentas têm utilização limitada a situações específicas onde possa ser encontrada uma solução matemática. Uma outra alternativa é utilizar métodos numéricos de análise, os quais podem fornecer soluções aproximadas para os problemas que estuda. Dentre os métodos numéricos de análise destaca-se o método dos elementos finitos. Este método segundo HUEBNER (1982) foi usado em engenharia pela primeira vez em 1960 por CLOUGH num estudo sobre problemas de elasticidade plana. Hoje este método é utilizado com sucesso no estudo de diversos problemas de engenharia, entre eles processos de conformação como forjamento. Existem hoje no mercado uma grande quantidade de programas baseados neste método, os quais executam simulações seguindo essencialmente as mesmas etapas, Figura 2.

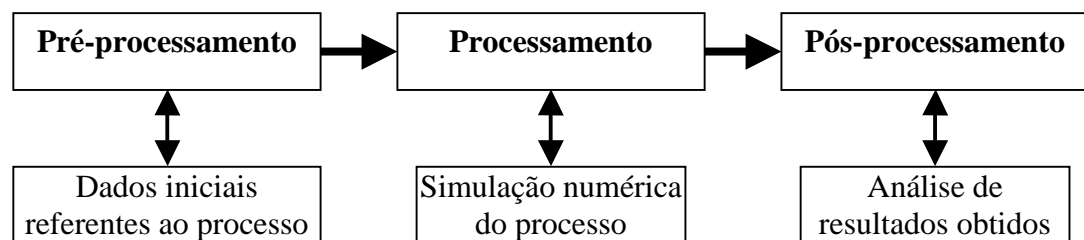


Figura 2: Etapas da simulação de processos usando programas baseados no método de elementos finitos.

2 FORJAMENTO DE VÁLVULA

Na fabricação de válvulas de motores de combustão interna podem ser utilizados dois processos de conformação: o processo de recalque (up-setting) ou extrusão. No caso de recalque apenas uma parte da barra é aquecida seguida de conformação da cabeça, ficando a haste da válvula no diâmetro original da barra de partida. Já na extrusão um pequeno tarugo, cortado por cisalhamento a quente a partir de uma barra, geralmente de diâmetro maior do que no caso de recalque, é totalmente aquecido e forçado a fluir através de uma matriz, conformando a válvula em duas etapas: (a) extrusão – onde é obtida uma pré-forma; (b) cunhagem – onde é obtida a forma final. A simulação de conformação que será apresentada a seguir, trata-se do forjamento de uma válvula de exaustão com grau de dificuldade de forjamento considerado elevado, Figura 3. Esta válvula é conformada a quente usando-se matriz fechada onde é posicionado o tarugo com uma temperatura inicial de forjamento entre 1140 a 1160°C e as matrizes, quando em regime de fabricação, alcançam uma temperatura entre 480 a 500°C. O material da válvula a ser forjada e das matrizes são respectivamente a liga Inconel 751 e o aço AISI H21. A liga Inconel 751 é uma liga a base de níquel endurecível por precipitação e apresenta uma resistência à deformação a quente elevada em relação aos aços comuns ou mesmo a aços inoxidáveis austeníticos, e apresenta uma faixa de temperatura de trabalhabilidade a quente limitada, originando deste fato a necessidade da presente simulação, visando otimizar o processo. A simulação apresenta a conformação da válvula nas duas etapas citadas.

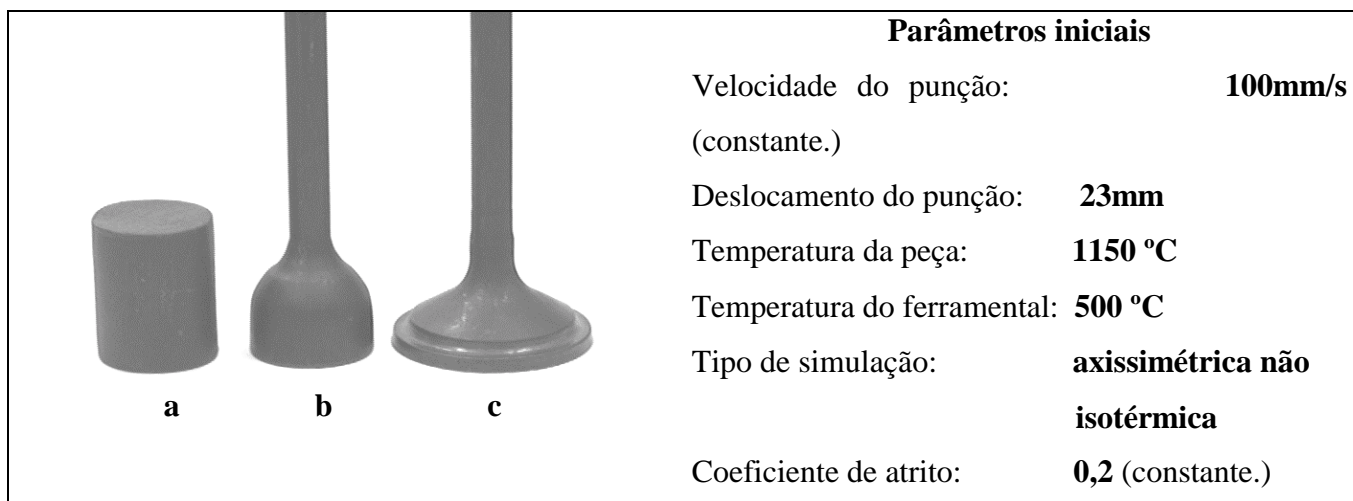


Figura 3: fases do forjamento da válvula, (a) tarugo inicial, (b) pre-forma , (c) forma final.

Para a simulação da conformação da válvula foi utilizado o programa DEFORM 2D, baseado no método de elementos finitos, com o qual foi possível realizar simulações do tipo axissimétrica. O programa utilizou uma estação de trabalho da Silicon Graphics. Os modelos de material utilizados para o Inconel 751 e AISI H21 foram respectivamente plástico e rígido.

As propriedades do materiais utilizados foram extraídas da literatura, de catálogos de fabricantes e do banco de dados existente no programa DEFORM. A Figura 4 apresenta as curvas de escoamento para duas velocidades de conformação e três temperaturas diferentes, como exemplos.

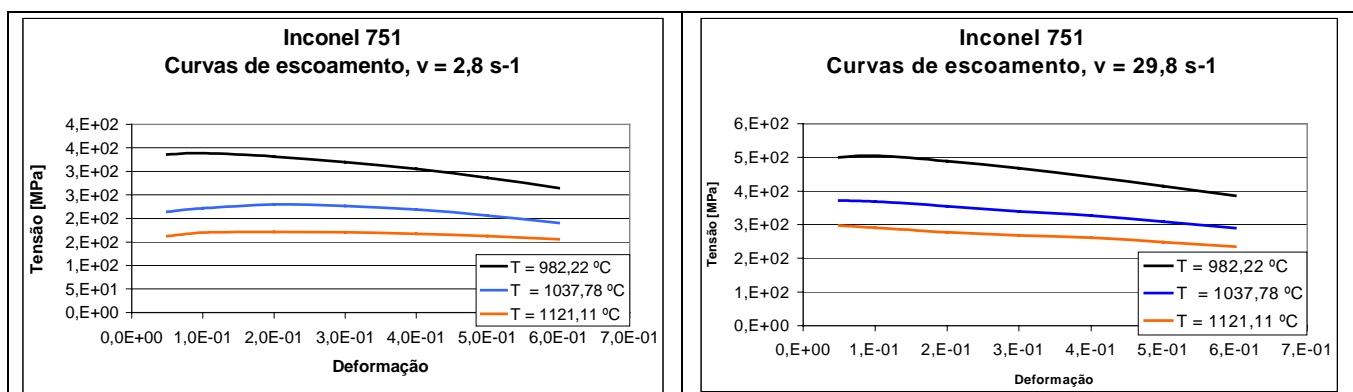


Figura 4: Curvas de escoamento do Inconel 751 à taxas de deformação de 2,8 e 29,8 s⁻¹ respectivamente, extraídas do banco de dados do DEFORM.

Foi adotado coeficiente de atrito na interface tarugo-matriz e tarugo-punção de 0,2 devido a que a literatura indica que para este tipo de conformação o coeficiente varia entre 0,1 e 0,3 (ALTAN, 1999). As propriedades térmicas dos materiais utilizados foram extraídas da literatura e catalogo de fabricantes.

3 RESULTADOS

A Figura 5 mostra uma seqüência da conformação da válvula durante a etapa de extrusão onde, são observados os gradientes de tensão efetiva. Pode ser notado claramente que a maior tensão tende a se localizar na região do pescoço da válvula, chegando a um valor máximo de 241 MPa. Aproximadamente. O resultado coincide com o observado na prática onde, devido a esta maior sollicitação, na região do pescoço, a matriz apresenta desgaste.

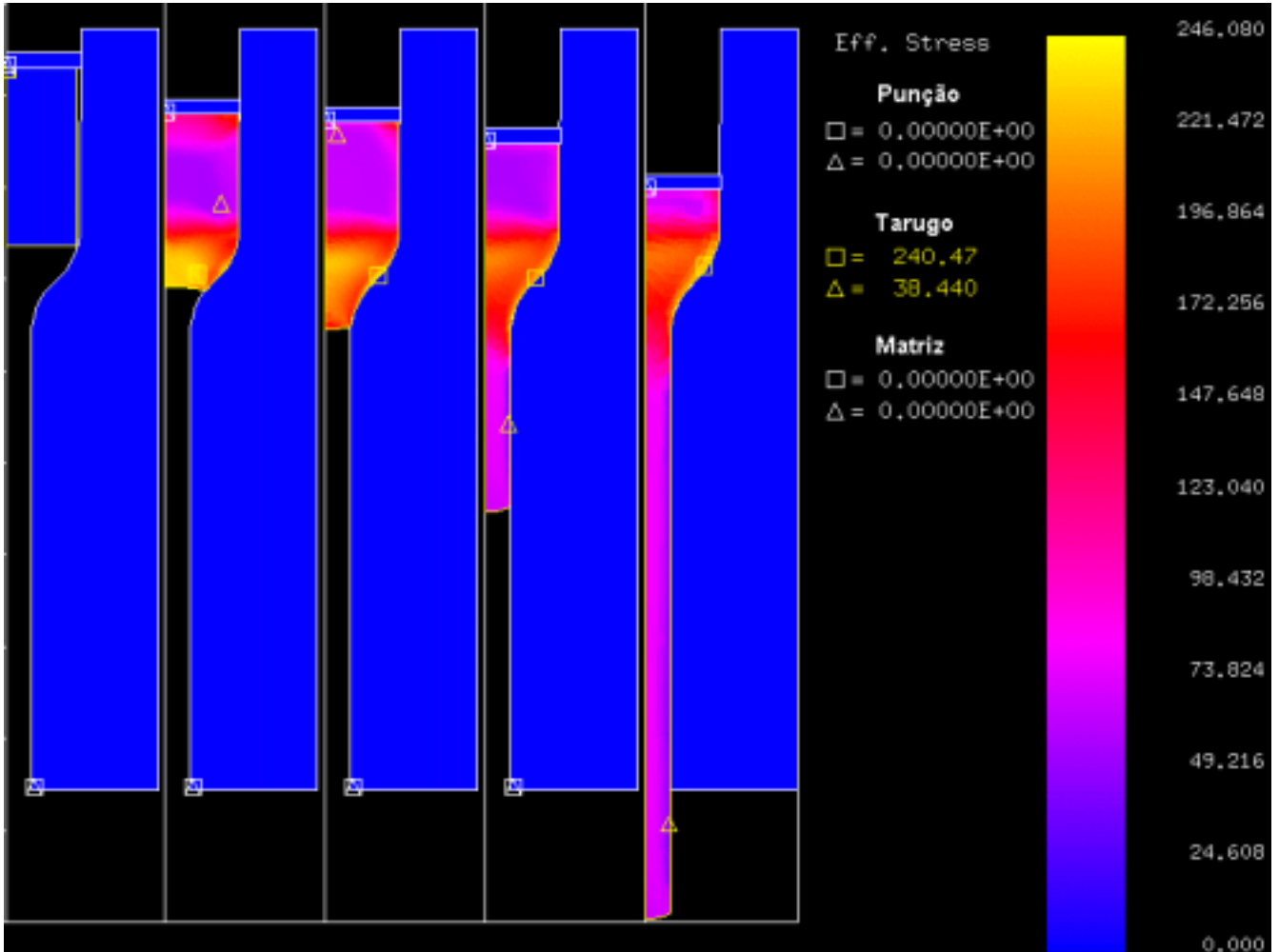


Figura 5: Seqüência da extrusão da válvula onde são mostrados gradientes de tensão efetiva [MPa].

A Figura 6 mostra a seqüência da conformação da válvula em sua etapa final de cunhagem, onde também são mostrados os gradientes de tensão equivalente. Nesta Figura 6 pode ser notado que a região de maior tensão está localizada na cabeça da válvula, diferente da etapa anterior, devido a que o material desse local tem que fluir até preencher totalmente a cavidade, enquanto que o preenchimento na região do pescoço é mínimo.

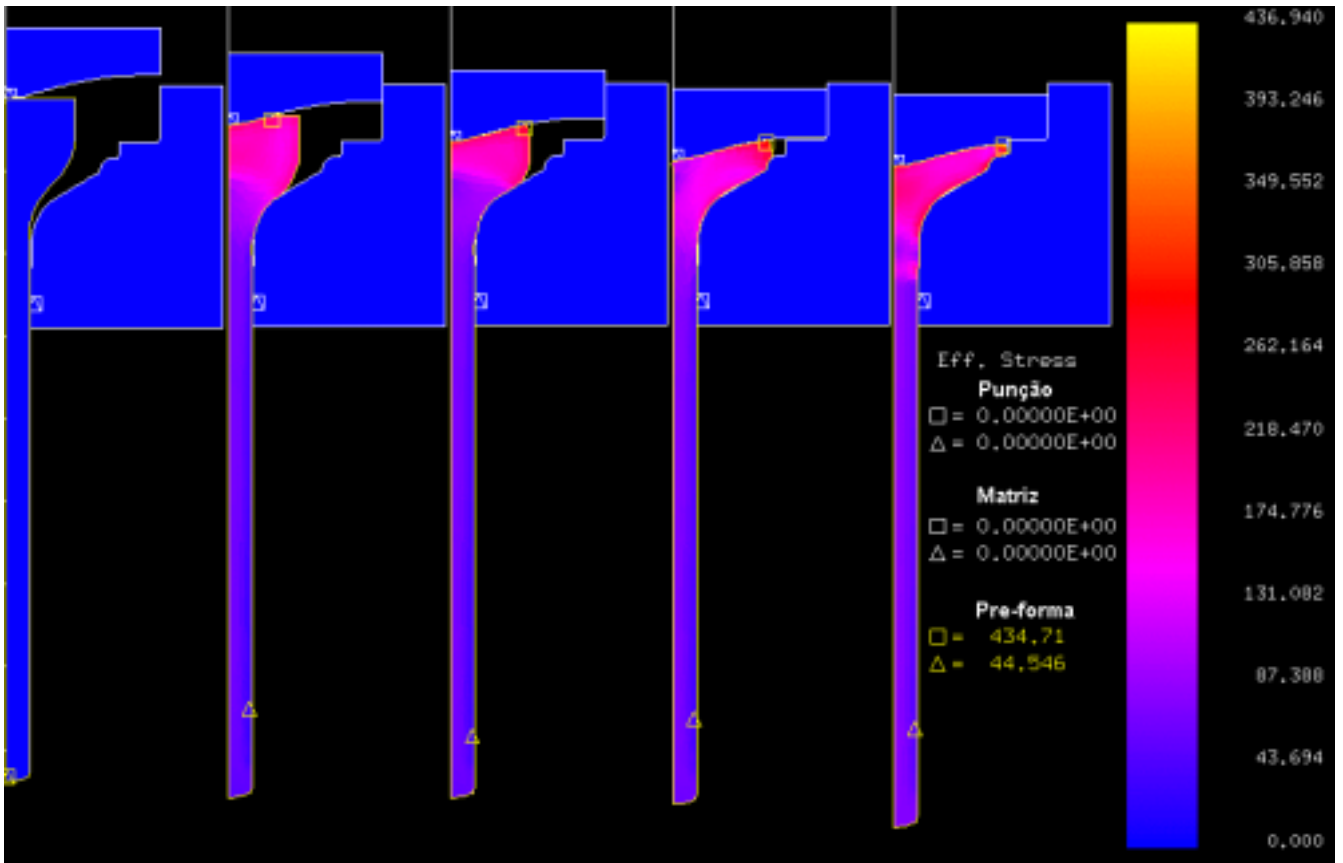


Figura 6: Sequência da etapa de cunhagem da válvula onde são mostrados gradientes de tensão efetiva [MPa].

A força necessária para a conformação da válvula em suas duas etapas é mostrada na **Figura 7** onde pode ser observado que a força de conformação na etapa de cunhagem ($1,08 \times 10^6$ N) chega a ser quase o dobro comparada com a força de conformação na etapa de extrusão ($5,49 \times 10^5$ N).

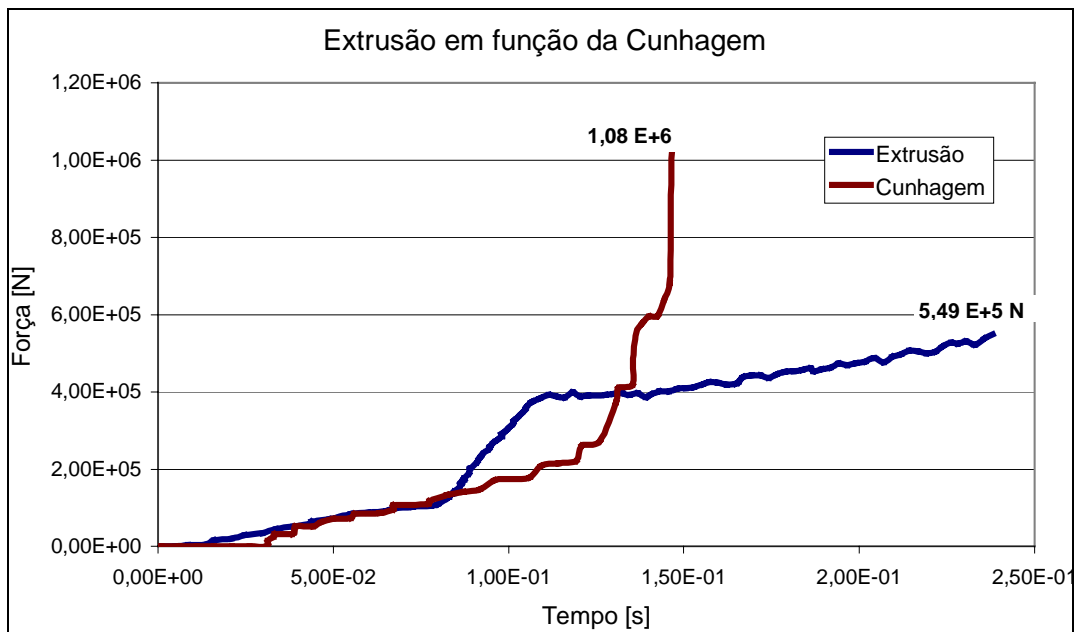


Figura 7: Gráfico da força necessária para conformação da válvula em suas duas etapas.

4 CONCLUSÕES

O programa de simulação por elementos finitos DEFORM demonstrou ser uma ferramenta poderosa de análise de processos de conformação. Possui a vantagem de ser um programa desenvolvido especificamente para este tipo de aplicação. Como seqüência a este trabalho será definido um fator de dano de materiais o qual deverá obtido através de ensaio de laboratório; este fator será fornecido ao programa de simulação como uma das condições iniciais na etapa de pré-processamento. Desta forma será possíveis localizar regiões onde possam surgir defeitos tanto no material sendo conformado como no ferramental empregado.

5 AGRADECIMENTOS

À Villares Metals S.A. pelo apoio para a realização deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

- Altan, t.; Oh, S. I.; Gegel, H. L., tradução de Coelho, R. T., et al (1999). “Conformação de metais: fundamentos e aplicações”. São Carlos, EESC-USP, 350p.
- Aparicio Sánchez, C. (2001). “Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear. São Carlos”. 126p. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Bathe, K. J. (1996). “Finite element procedures”. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1037p.
- Belli, F.; Schaeffer, L. (1997). “Forjamento a morno de aço 16MnCr5”. I Conferência Internacional de Forjamento, São Paulo/SP.
- de Lima, T. R. (1994). “Simulação por elementos finitos de processos de conformação a quente”. XIV Seminário nacional de forjamento. Porto Alegre, p.113-121.
- dos Santos, J.; Müller, D.; Glufke, L.; Schaeffer, L. “Recursos informáticos agilizam o processo de conformação”, Maquinas e metais, Vol. 428, pp. 146-157.
- Helman, H., Cetlin, P. R. (1983). “Fundamento da conformação mecânica dos metais”. Ed. Guanabara dois S. A. Rio de Janeiro – RJ.
- Kobayashi, S.; Oh, S. I.; Altan, T. (1989). “Metal forming and the finite element method”. New York, Oxford University Press, 377p.
- Oh, S.; Wu, W.; Tang, J. (1994). “Forming simulation by the DEFORM system”. XIV Seminário nacional de forjamento, Porto Alegre, RS. p249-253.
- Roque, C.; Button, S. (2000). “Application of the finite element method in cold forging processes”. Journal of the brazilian society of mechanical sciences. Rio de Janeiro, vol.22.
- Sagradi, M. et al. (1994). “Análise prática da simulação de forjamento por elementos finitos”. XIV Seminário nacional de forjamento. Porto Alegre/RS. p28-44.
- Sheljaskow, S. (1998). “Technological aspects of warm forging”. II conferência internacional de forjamento, Porto Alegre/RS. p89-97.

SIMULATION DEVELOPMENT OF FORGING PROCESS USING FINITE ELEMENTS METHOD

César Antonio Aparicio

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Av. do Trabalhador Saocarlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos – SP. Brazil.
e-mail: aparicio@sc.usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos
Av. do Trabalhador Saocarlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos – SP. Brazil.
e-mail: rtcoelho@sc.usp.br

Celso Antonio Barbosa

Villares Metals S.A. - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
R. Alfredo Dumont Villares, 155, CEP: 13177-900, Sumaré – SP. Brazil.
e-mail: celsoa@villares.com.br

Abstract: Simulation of metal forming processes is nowadays an useful tool, in part to a better knowledge of the behavior of materials and processes, as well as the great technological progress in the field of computing science in the last two decades, which was very important to the development of new programs and the performance of simulation programs. During initial production trial, the utilization of numerical simulation can result in reduction costs due the possibility to vary the conditions, accelerating the product development due to be a non destructive test. In this paper is shown the forging processes simulation of a valve in closed die using the finite element DEFORM. The initial processing conditions and material properties were applied to the program. The results obtained can show the material flux in the die, maximum stress and forging force. The next step will be the comparison of the numerical results obtained and real practical results whit the aim of get simulation validation.

Keywords: *Finite elements, forging, metal forming, valve.*