# INFLUÊNCIA DA CURVA DE ESCOAMENTO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE DA LIGA DE TITÂNIO Ti-6Al-4V

# INFLUENCE OF THE CURVE OF FLOW IN THE COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE HOT FORGING PROCESS OF THE TITANIUM ALLOY Ti-6AI-4V

#### Eduardo André Hentz<sup>1</sup>, Lírio Schaeffer e Pedro K. Knoll

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS Laboratório de Transformação Mecânica Av. Bento Gonçalves, 9500, CP: 15021 Porto Alegre, RS Brasil <sup>1</sup>E-mail: eduardo.hentz@ufrgs.br

#### **RESUMO**

Neste trabalho é apresentado uma simulação computacional de um processo de forjamento a quente de uma peça com a liga de titânio Ti-6Al-4V com auxílio do programa computacional LARSTRAN/SHAPE, que é um programa de elementos finitos e permite a solução bi e tridimensional. Empregando-se diferentes curvas de escoamento, foi comparado sua influência com a força de forjamento num procedimento experimental. Alguns parâmetros utilizados foram: velocidade da prensa utilizada foi de 6,7 mm/s, temperatura inicial de forjamento 950°C e a velocidade de deformação média de 0,52 s<sup>-1</sup>. **Palavras-chave**: Simulação, Ti-6Al-4V, curvas de escoamento.

#### ABSTRACT

In this work is presented a simulation process of hot forging with the titanium alloy Ti-6Al-4V using the computational program LARSTRAN/SHAPE, which is a program of finite elements and allows to the bi and three-dimensional solution. Using different curves of flow, it was compared its influence with the forging force in an experimental procedure. Some used parameters were: the speed of press was of 6.7 mm/s, the initial temperature of forging was of 950°C and the average strain rate was of  $0.52 \text{ s}^{-1}$ .

Keywords: Simulation, Ti-6Al-4V, curves of flow.

#### 1 – INTRODUÇÃO

O forjamento é um processo de fabricação em série de peças metálicas direcionado às mais variadas aplicações. O processo pode ser classificado em forjamento a frio, a morno ou a quente em função da temperatura de recristalização que ocorre durante a conformação. Outra forma de classificação diz respeito à geometria das matrizes, podendo ser aberta, fechada com rebarba ou fechada sem rebarba. Em geral as peças produzidas por este processo sofrem, após o forjamento, operações de usinagem onde grande quantidade de material é retirada [1].

O ponto chave é que as razões para começar uma boa deformação no forjamento são eliminar todas as porosidades do material e refinar o tamanho de grão, também começar a quebrar as inclusões de impureza dos aços e não-ferrosos.

A utilização do titânio e suas ligas vêm sendo largamente exploradas devido à combinação de sua alta resistência mecânica com baixa densidade e, ainda, excelente resistência à corrosão. Este material tem sido empregado, principalmente, nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, petrolífera, materiais biomédicos e em competições automotivas como a Fórmula-1.

A conformação a quente do titânio é geralmente realizada em alta temperatura devido à redução da tensão de escoamento do material e da possibilidade da ocorrência de trincas e falhas no preenchimento. A curva de escoamento desta liga é fortemente dependente da temperatura e da velocidade de deformação [2]. As propriedades mecânicas desta liga são muito sensíveis ao índice de oxigênio e a microestrutura, porque o oxigênio é um estabilizador da fase alfa e faz com que a fase beta se transforme em temperaturas mais altas [3].

O método de elementos finitos (FEM) pode modelar o processo industrial do forjamento e avaliar as condições do processo ou dos parâmetros de projeto e os resultados servem para uma decisão melhor da engenharia [4], podendo ser testados e analisados sob diversas situações e quantas vezes for necessária num curto espaço de tempo, o que representa economia por se tratar de testes computacionais. Desde o final da década de 60, com os primeiros trabalhos de simulação computacional e método de elementos finitos (FEM) voltados para a conformação mecânica, pode-se com maior perfeição efetivar a análise dos processos de conformação em vários aspectos: distribuição da deformação, tensões nas ferramentas, efeito das velocidades de deformação, gradiente de temperatura na peça, preenchimento da matriz, entre outros. A formulação do método de elementos finitos, em linhas gerais, consiste em discretizar a peça a ser deformada em um número finito de elementos, minimizar o funcional representativo da energia envolvida na conformação, calcular as equações discretas da elastoplasticidade, verificar equações de compatibilidade para os valores de tensão obtidos [5]. Durante a minimização do variacional, os valores de velocidade servem de entrada para os cálculos das deformações e tensões durante a simulação. O procedimento acima é realizado em pequenos intervalos de tempo que representam a divisão do tempo da operação de conformação sendo analisada [6]. Os dados dos materiais que alimentam os programas, como a curva de escoamento, coeficiente de atrito, dados térmicos, etc. são necessários a solução dos problemas práticos.

Semiatin et al [7] estudou o comportamento de ligas de titânio com uma microestrutura lamelar em termos de curvas de escoamento e mecanismos de deformação estudando amostras com diferentes tamanhos iniciais de grãos. Para a liga Ti-6Al-4V, as curvas de escoamento (ver Figura 1) exibem um pico de resistência ao escoamento em deformações relativamente baixas (menos do que 0,03) seguida de moderado à intensiva diminuição da resistência ao escoamento. O grau de diminuição da resistência ao escoamento é semelhante a 815 °C e 900 °C, mas é levemente menor a 955 °C. Além disso, todas as curvas de escoamento tendem a exibir uma menor taxa de diminuição da resistência ao escoamento para deformações na ordem de 0,7. As curvas de escoamento para a liga Ti-6Al-4V com tamanho de grão beta de 100 µm são essencialmente idênticas às curvas do material com tamanho de grão de 400 µm.



Figura 1. Curvas de escoamento obtidas em testes de compressão a quente para velocidades de deformação de 0,001; 0,1 e 10 s<sup>-1</sup> (a) 815 °C, (b) 900 °C e (c) 955 °C [12].

Neste trabalho objetivou-se analisar a influência das curvas de escoamento, duas retiradas de artigos técnicos, Bruschi *et al* [8] e Nho-Kwang Park *et al* [9], outra do programa Msc.Superforge 2005 e a última de Brito [10], que melhor descrevem o processo de forjamento a quente. Empregou-se a liga Ti-Al6-V4 para uma geometria previamente definida realizando-se o teste experimental para a comparação com a simulação computacional. Esta análise foi feita com o auxílio do programa Larstran/shape baseado na teoria de elementos finitos (FEM).

#### 2 - CURVAS DE ESCOAMENTO

As quatro curvas de escoamento para o forjamento de titânio para a temperatura de  $950^{\circ}$  C, oriunda de publicações de Bruschi, *et al* [8], Nho-Kwang Park *et al* [9], programa Msc.Superforge 2005 e a última de Brito [10]. A Figura 2 demonstra as quatro curvas de escoamento para a temperatura de  $950^{\circ}$  C para velocidades de deformação de 0,05 a 1 s<sup>-1</sup>.

A curva de escoamento descrita por Bruschi *et al* [8] pode ser descrita pela Equação 1:

$$k_{f} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$
(1)

Onde, Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, Q é a energia de ativação e A,  $\alpha$  e *n* são constantes dependentes da velocidade de deformação, da temperatura, da deformação e da resistência ao escoamento. Obtendo Q, *n*, e  $\alpha$  experimentalmente, Bruschi calculou o valor de A, para a liga Ti-6Al-4V como uma média dos valores de diferentes resistências ao escoamento e velocidades de deformação, estes valores são: Q=501 kJ/mol, *n*=5, A=2,25 x  $10^{21}$  s<sup>-1</sup>,  $\alpha$ =0,0066 MPa<sup>-1</sup>. Com estes valores pode-se calcular Z pela Equação 2.

$$Z = \phi^* \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

A curva de escoamento, descrita por Nho-Kwang Park et al [9] extraída da Figura 3 segue o mesmo principio da equação anterior, através da retirada de valores referentes a tensão de escoamento e diferentes velocidades de deformação para a temperatura de 950° C, Equação 3:

$$kf = 82.9 * \left( \stackrel{\bullet}{\varphi} \right)^{0,209} \tag{3}$$

A equação que descreve a curva de escoamento foi extraída do programa Msc.Superforge 2005 pela Equação 4.

$$kf = 104.6 * \left( \stackrel{\bullet}{\varphi} \right)^{0.169}$$
 (4)

A equação que descreve a curva de escoamento foi descrita em Brito [10] por meio da Equação 5.

$$kf = 17714^{*}e^{(-0.00564T)} * \varphi^{(-0.165)} * \varphi^{(0.152)}$$
(5)



Figura 2. As quatro curvas de escoamento do material Ti-AL6-V4 conforme diferentes fontes.



Figura 3.  $k_f \ge T$ , para diferentes velocidades de deformação. Fonte: Nho-Kwang Park *et al* [9]

### 3 - MÉTODO E MATERIAIS

A peça escolhida para ser este estudo foi uma polia forjada com as dimensões mostradas na Figura 4. As dimensões da geratriz utilizada eram  $\phi$  50,20 mm x 25,00 mm. As matrizes utilizadas estão apresentadas na Figura 5.





(b) Figura 4. (a) Geratriz. (b) Peça forjada.



Figura 5. (a) Matriz superior. (b) Matriz Inferior.

#### 4 – O PROGRAMA PARA A SIMULAÇÃO DO FORJAMENTO

Para a simulação do processo foi utilizado o programa Larstran/Shape. É um programa baseado no método de elementos finitos que permite a solução bi- e tridimensional de problemas de conformação mecânica. É muito utilizado para simular processos de forjamento, extrusão e laminação. Também permite cálculos com e sem acoplamento termo-mecânico e utilizando um módulo especial é possível simular até a evolução microestrutural das peças.

A preparação do modelo foi feita utilizando o programa PEP, que é um pré e pós-processador, que serve de interface gráfica do Larstran. Possui um editor gráfico próprio para modelagem de peças e ferramentas, além de uma série de filtros que permitem aproveitar modelos construídos em outros programas de CAD, como o Solidworks. O PEP também conta com um módulo para o pós-processamento, ou seja, a apresentação e visualização dos resultados que foram previamente simulados no Larstran [6].

#### 4.1 Modelagem e Cálculos

Na modelagem para esta simulação foi escolhida a bidimensional devido à peça não ser complexa e apresentar simetria radial (Figura 6), isto também reduz o tempo de processamento e o acoplamento utilizado é termomecânico.



Figura 6. Simetria radial da peça em estudo.

Os cálculos do acoplamento termo-mecânico realizados utilizam os dados do material. A curva de escoamento que é obtida a partir dos valores de plotados uma tabela, cada anotação na tabela exige que sejam dados valores para a temperatura, velocidade de deformação, deformação e valores da curva de escoamento. Com base nesses dados, a curva de escoamento ( $kf = f(\phi, \phi, T)$ ) é calculada através de interpolação bilinear. Com isso teremos infinitas curvas de escoamento com variação de temperatura, velocidade de deformação.

Para os cálculos no programa Larstran/shape foram utilizados para todas as curvas de escoamento os dados que seguem:

- Tamanho da malha = 1 mm (Este foi definido através de varias simulações onde se observou que malhas com tamanho maior penetravam na ferramenta);
- Coeficiente de atrito (μ) de 0,5 (Foi realizado ajuste do modelo em função do coeficiente de atrito devido à dificuldade de obtenção deste dado na prática);
- Velocidade de ferramenta (vf) de 6,7 mm/s;
- Temperatura ( $\mathcal{G}_M$ ) das matrizes 358 K;
- Densidade ( $\rho$ ) do material de 0,00000443 kg/mm<sup>3</sup>;
- Calor específico ( $c_p$ ) de 526,3 j/kg\*K;
- Condução de calor ( $\lambda$ ) de 0,0067 W/mm\*K;
- Módulo de elasticidade (E) de 113.800 N/mm<sup>2</sup>;
- Expansão de calor de 0,0000097 1/K;
- Coeficiente de transferência de calor (α) 0,04 W/mm<sup>2</sup>\*K;
- Coeficiente de radiação (*E*) 0,7;
- Temperatura da geratriz (T) considerada homogênea 1223 K;
- Temperatura ( $\mathcal{G}$ ) ambiente de 298 K.

O final do processo da simulação (Figura 7) mostra o preenchimento total da peça com rebarba. O remalhamento ocorrido é gerado automaticamente pelo programa, podendo ser alterado no caso da malha penetrar para a parte interna da ferramenta.



Figura 7. Final do processo de conformação mecânica da peça forjada (simulação).

## 5 – ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi utilizada uma barra ( $\phi$  50,20 mm) da liga de titânio  $\alpha+\beta$ , Ti-Al6-V4. A composição química da liga de titânio Ti-Al6-V4 para o forjamento e das curvas de escoamento é apresentada na Tabela 1.

O forjamento (Figura 8) foi efetuado em uma prensa hidráulica FKL com capacidade de 750 toneladas com uma velocidade de ferramenta de aproximadamente 7 mm/s. Os dados de força de prensagem foram adquiridos por uma célula de carga com capacidade de 300 toneladas, enquanto que os dados de deslocamento da prensa foram obtidos por um extensômetro da empresa Novotechnik modelo T50. Ambos os equipamentos foram acoplados ao sistema de aquisição de dados (Spider 8 + Software Catman Express 3.1) o qual fornecia, também, o tempo de aquisição.

Tabela 1. Composição química da liga de titânio Ti-Al6-V4. Todo o elemento tem o teor em peso em %.

Elementos	Teor (% em peso)					
Al	5,72	6,28	6,33			
V	4,10	3,97	4,00			
Fe	0,37	0,052	0,20			
0	0,15	0,18	0,17			
Ν	0,04	0,0062	< 0,01			
Н	0,013	0,0049	0,004			
С	0,065	0,008	0,03			
Ti	Balanço	Balanço	Balanço			
Fornecedor	Análise experimental [11]	BRUSCHI	Nho- Kwang Park			





Figura 8. (a) Croqui da montagem do forjamento. (b) Imagem da geratriz posicionada na matriz com termopar interno.

#### 6 - RESULTADOS

#### 6.1 Análise da força

No forjamento experimental realizado, a peça foi retirada do forno com uma temperatura inicial de 980°C e constatou-se uma perda de aproximadamente 30°C durante o forjamento, constatado através da leitura obtida com termopares na geratriz (Figura 8). A força total de forjamento constatada pela célula de carga foi de aproximadamente 191 toneladas, como mostra a Figura 9 [12].



Figura 9. Gráfico da força versus deslocamento obtido no forjamento experimental.

#### 6.2 Análise da simulação do processo

A força necessária para o forjamento da peça estudada obtida na simulação computacional para as curvas de escoamento Bruschi *et al* [8], Nho-Kwang Park *et al* [9], Msc.Superforge e Brito [10] estão demonstradas na Figura 10.



Figura 10. Gráfico da força versus deslocamento obtidas na simulação computacional para as quatro curvas de escoamento.

Conforme a Tabela 2 pode-se observar as tensões e as temperaturas obtidas na simulação e demonstradas em três pontos diferentes da peça no final do processo (ver Figura 11). As tensões obtidas na peça podem ocorrer nas matrizes, principalmente nas partes que estão em contato com a peça.



Figura 11. Pontos onde foram coletados os dados de tensão e temperatura

Tabela 2. Cálculo de temperatura e de tensão de escoamento para diferentes curvas de escoamento.

Ponto /	Temperatura		Tensão			
Curva de	(°C)		Escoamento			
escoamento			(MPa)			
	1	2	3	1	2	3
Msc.Superforge	663	767	976	144	87	77
Nho-Kwang Park	648	756	999	82	50	82
Bruschi	671	723	982	186	100	112
Brito	639	588	895	96	68	96

### 7 - CONCLUSÕES

Considerando as quatro curvas de escoamento e a simulação utilizada neste trabalho concluiu-se que:

O método de Elementos Finitos é uma ferramenta para otimizar o processo desde que os dados de entrada representem corretamente o que será reproduzido na prática. Neste estudo verificou-se que a curvas de escoamento, Bruschi *et al* [8], utilizada na previsão da força, apresentou uma diferença razoavelmente superior a obtida no experimento prático, servindo para o problema proposto, o resultado obtido na simulação foi superior a 17 % da força obtida experimentalmente. Enquanto as curvas de escoamento de Nho-Kwang Park *et al* [9], Msc.Superforge e Brito [10], foram muito inferiores a obtidas no experimento prático, mas com a obtenção do atrito real do processo, conseguiríamos concluir qual a curva de escoamento que descreve melhor o resultado obtido na prática.

A variação da força de forjamento obtida nas simulações pode estar ligada à composição química e a microestrutura da liga, que influenciam a curva de escoamento do material, pois o titânio fabricado em países diferentes apresenta pequenas mudanças microestruturais que acarretam mudanças na força de forjamento.

A força obtida experimentalmente serve apenas como referência, pois não foi possível obter o coeficiente de atrito do sistema para a temperatura de forjamento utilizada.

As temperaturas no final do processo da peça forjada, para as quatro curvas de escoamento simuladas, a Bruschi *et al* [8], Nho-Kwang Park *et al* [9] Brito [10] e Msc.Superforge não se aproximaram da zona de transformação beta, que para esta liga é de aproximadamente 1010°C [13]. Valores de temperatura acima da zona beta não são desejáveis porque são facilmente oxidadas, aumentando a perda de material e ocorrendo uma mudança micro estrutural.

#### AGRADECIMENTO

Agradecimento ao projeto CT-Petro do CNPq. Processo  $n^\circ.\ 504967/2004\text{-}5$ 

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

 Schaeffer, L. - <u>Forjamento – Introdução ao Processo.</u> – Editora Imprensa Livre. Porto Alegre. 2001;
A. Majorell, S. Srivatsa, R.C. Picu. <u>Mechanical behavior of</u> <u>Ti-6Al-4V at high and moderate temperatures</u>—Part I: Experimental results. Materials Science and Engineering, A326, 2002, 297–305.

[3] Y.V.R.K. Prasad, T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier Infuence of oxygen content on the forging response of equiaxed ( $\alpha + \beta$ ) preform of Ti6Al4V: commercial vs. ELI

grade." Journal of Materials Processing Technology, n. 108, 2001, p. 320-327.

[4] Rong Shean Lee, Huan Chang Lin. <u>Process design based on</u> the deformation mechanism for the non-isothermal forging of Ti– <u>6Al–4V alloy.</u> Journal of Materials Processing Technology, n. 79, 1998, p. 224–235.

[5] Santos, C.A; Pertence, A. E. M.; Aguilar, M. T. P; Cetlin, P. R. – <u>Avaliação Computacional do Desempenho do Conjunto de</u> <u>Matrizes Utilizado no Forjamento de Componentes</u>. Editora Brasul Ltda. Porto Alegre, 2004. Anais 24º Senafor, Conferência Internacional de Forjamento.

[6] Richter, A.; Brito, A.; Silva Dos Santos J.W.; Schaeffer, L. <u>Simulação do processo de forjamento de um eixo com roda</u> <u>dentada usando o método de elementos finitos</u>. Editora Brasul Ltda. Porto Alegre, 2001. Anais 21° Senafor, Conferência Internacional de Forjamento.

[7] Semiantin, S.L.; Seetharaman, V.; Ghosh, A.K. – <u>Plastic flow,</u> microstructure evolution, and defect formation during primary hot working of titanium and titanium aluminide alloys with <u>lamellar colony microstructures</u>. The Royal Society, A357, 1999, p. 1487 – 1512

[8] Bruschi, S.; Poggiob, S.; Quadrinib, F.; Tatab, M.E. Workability of Ti–6Al–4V alloy at high temperatures and strain rates. – *Materials Letters*. n. 58, 2004, p. 3622 – 3629.

[9] Nho-Kwang Park, Jong-Taek Yeom, Young-Sang Na. <u>Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-6Al-4V using processing maps</u>. Journal of Materials Processing Technology, 130–131, 2002 p. 540–545.

[10] BRITO, A. M. G. <u>Forjamento Progressivo: Processo</u> <u>Alternativo para Prensas de Pequena Capacidade</u>. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, RS, 1989.

[11] Realum Indústria Comércio de Metais Puros e Ligas Ltda, SP.

[12] Knoll, K. P.; SCHAEFFER, L. <u>Análise Analítica, Numérica</u> <u>e Experimental do Forjamento a Quente da Liga Ti-6Al-4V</u>. Gráfica Metrópole, Porto Alegre, 2006. Anais 26° Senafor.

[13] American Society For Metals – <u>Forming and Forging.</u> <u>Metals Handbook</u>. 9<sup>th</sup> ed. Metals Park, Ohio, 1988. Vol. 14, p. 589–628.