

FORJAMENTO PROGRESSIVO DE LIGAS DE TITÂNIO DE APLICAÇÃO AERONÁUTICA¹

Alberto Moreira Guerreiro Brito²
Lírio Schaeffer³

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do forjamento progressivo para a produção de peças de ligas de titânio em prensas de pequena capacidade. Por forjamento progressivo entende-se o processo de forjamento de uma peça em vários passos onde, a cada passo, as ferramentas tocam apenas uma parte da mesma. O processo é bastante adequado a produção de estruturas do tipo "rib-web" usadas, fundamentalmente, na indústria aeronáutica. Foram conduzidos testes utilizando uma liga de titânio TiAl6V4 para a obtenção de um peça do tipo "rib-web". O principal objetivo desses testes foram atingir uma geometria pré-fixada, com uma prensa de pequena capacidade e com diferentes formas de aplicação das ferramentas. O material utilizado foi ensaiado de forma a determinar-se curvas de escoamento em diferentes condições de temperatura e velocidade de deformação, o atrito com as ferramentas de forjamento e os diferentes coeficientes de troca de calor envolvidos no processo. Os resultados finais obtidos demonstraram a viabilidade do processo progressivo na produção de peças forjadas a serem usinadas posteriormente. Foi também verificado que programas de simulação podem auxiliar no desenvolvimento de projetos de forjamento desde que alimentados com dados adequados. Curvas de escoamento para a liga TiAl6V4, em uma ampla faixa de temperaturas e velocidades de deformação, valores de fator de atrito e os coeficientes de troca de calor envolvidos no processo e utilizados nas simulações são também apresentados.

Palavras-chave: Forjamento progressivo; Simulação numérica; Forjamento de titânio.

INCREMENTAL FORGING OF TITANIUM ALLOYS FOR AERONAUTICAL APPLICATIONS

Abstract

The objective of this work is to study the viability of the incremental forging process for the production of parts of titanium alloys in small capacity presses. Incremental forging is the process in which the part is deformed in several steps and the tools touch only a segment of the part in each step. The process is quite adapted for the production of "rib-web" frames used in the aeronautical industry. Tests was carried out to product a "rib-web" part in TiAl6V4 alloy. The main objective of these tests had been to reach a specified geometry, with a small capacity press and different ways of tools application. The material was tested to determine stress-strain curves in different temperatures and strain rate, the friction with the forging tools and the heat transfer coefficients involved in the process. These data are showed in the work and had been used to simulate the process using a based commercial software based in the finite volumes method. The results show the viability of the incremental forging to the production of forged parts that will be submitted to machining finish. It was verified that simulation programs can assist in the development of projects of incremental forging since that fed with adequate data.

Key words: Incremental forging; Numerical simulation; Forging of titanium alloys.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Engenheiro Metalúrgico, Mestre em Engenharia, Pesquisador, Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

³ *Prof. Titular, Dr. Eng., Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

1 INTRODUÇÃO

Um importante aspecto da produção industrial é a otimização do custo e da qualidade dos produtos através da melhoria dos processos de produção. A necessidade de economia de energia e matéria prima, aumento da produtividade e da rentabilidade assume cada vez mais um maior significado.

Em vista disto tem sido observado um aumento na aplicação dos processos de conformação, em detrimento dos processos de usinagem, na fabricação em série de peças. A substituição do processo de usinagem pelo processo de forjamento (seguido ou não de usinagem) muitas vezes não é executado devido a problemas com a capacidade da prensa. É nesse ponto que o forjamento progressivo surge como uma possível alternativa visto que nesse processo a força necessária para forjar determinado componente é menor do que a força que seria necessária para forjá-lo pelo processo convencional. Por forjamento progressivo entende-se o processo de forjamento de uma peça em vários passos onde, a cada passo, as ferramentas tocam apenas uma parte da mesma.

Com base no exposto acima que este trabalho foi desenvolvido. Foram conduzidos testes com uma liga de titânio TiAl6V4 para a obtenção da peça vista na Figura 1. O principal objetivo desses teste é atingir uma geometria pré-fixada, com uma prensa de pequena capacidade e com diferentes formas de aplicação das ferramentas.

O material utilizado foi ensaiado de forma a determinar-se a curva de escoamento do mesmo em diferentes condições de temperatura e velocidade de deformação, o atrito entre o mesmo e as ferramentas de forjamento e os coeficientes de troca de calor entre ele e o meio (matriz e/ou ambiente).

As curvas de escoamento foram determinadas através do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos entre placas planas. O fator de atrito, segundo o modelo de Prandt é determinado através de uma técnica de calibração inversa utilizando o teste do anel plano e o programa de simulação MSC.SuperForge, utilizando o método de volumes finitos. Da mesma forma os coeficientes de troca de calor são determinados utilizando-se o programa MSC.SuperForge e dados medidos em um corpo de prova padrão. Os procedimentos de obtenção tanto das curvas de escoamento, quanto do fator de atrito e dos coeficientes de troca de calor já foram apresentados anteriormente pelos autores^(1,2) e são por esse motivo omitidos neste trabalho.

Simulações do processo de forjamento também foram realizadas com o programa MSC.SuperForge, visando dar suporte ao trabalho experimental. Ao mesmo tempo os resultados experimentais são utilizados para validar os resultados das simulações.

2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO PROGRESSIVO

Conforme mostrado esquematicamente na Figura 2, o forjamento progressivo pode ser definido como o processo de conformação mecânica de uma peça em vários passos, tais que, a cada passo, as ferramentas tocam apenas uma parte da mesma. A principal vantagem do processo progressivo em relação ao processo convencional é mostrada na figura. Na parte superior o caso convencional para o forjamento em matriz fechada e em matriz aberta. Ambos os processos atingem seus limites quando a força de conformação $F = k_w \cdot A$ (onde k_w é a resistência a deformação e A é a área projetada da peça) é igual a capacidade nominal da

máquina (F_N). A alternativa pelo processo progressivo é mostrada na parte inferior da figura. Nesse caso, a deformação total é dividida em várias etapas menores, necessitando para tanto menos força do que pelo processo convencional.⁽³⁾

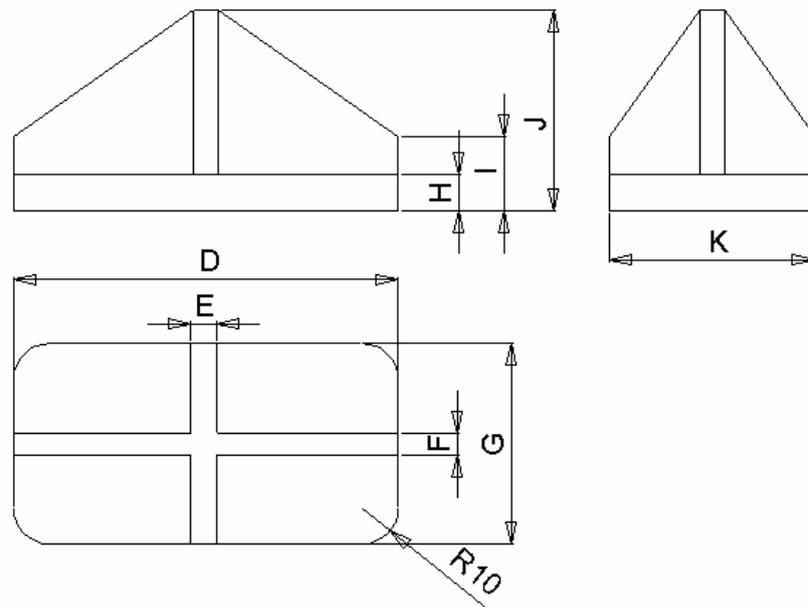


Figura 1. Representação esquemática da peça final a ser obtida ($D = 102$ mm; $E/F = 5$ mm; $G/K = 55$ mm; $H = 12$ mm; $I = 17$ mm; $J = 52$ mm)

Uma vantagem adicional do forjamento progressivo é a economia de energia através da economia de matéria prima pois peças que convencionalmente seriam usinadas podem ser facilmente forjadas até perto das dimensões finais.

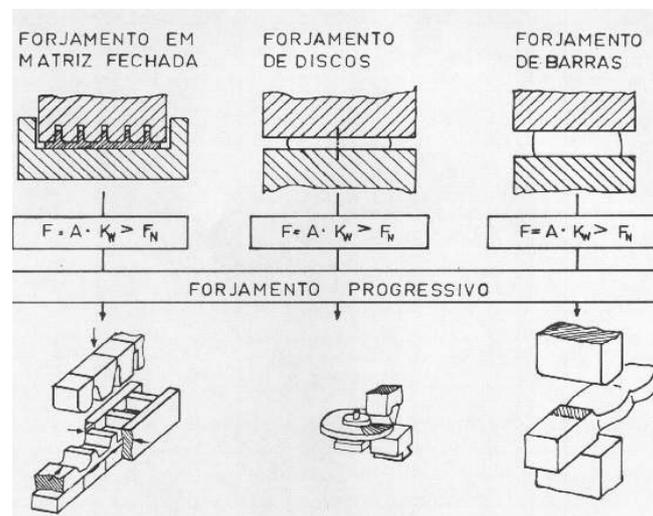


Figura 2. Comparação esquemática entre o forjamento convencional e o forjamento progressivo para diferentes processos.⁽³⁾

O primeiro trabalho sistemático sobre forjamento progressivo que os autores puderam localizar foi realizado por Abramovitz e Schey⁽⁴⁾ no início da década de 1970. Nesse trabalho, Abramovitz e Schey procuraram obter uma peça tipo “rib-web” através de uma seqüência de indentações com um punção pequeno. Verificaram, que os parâmetros críticos são o comprimento do punção em relação a altura

instantânea do corpo de prova e a relação entre a espessura inicial do “rib” e o comprimento da ferramenta.

Trabalhos mais recentes⁽⁵⁻⁸⁾ abordando o forjamento de engrenagens, cilindros, discos, cremalheiras, pontas de eixo, etc, confirmam que os parâmetros críticos do processo são os determinados por Abramovitz e Schey.⁽⁴⁾

3 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE TITÂNIO PARA FORJAMENTO

Os aspectos econômicos relacionados com a seleção dos materiais são tão importantes quanto as considerações de natureza tecnológica relacionadas com as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos mesmos. A Figura 3 mostra uma indicação do custo relativo de diversos materiais, bem como o custo relativo de vários bens de consumo representativos de diferentes setores da atividade industrial.⁽⁹⁾ A escolha do titânio como material de estudo encontra justificativa na figura: material de alto valor e com aplicações relacionadas a setores de alta tecnologia como as indústrias aeronáutica, aeroespacial e biomédica.

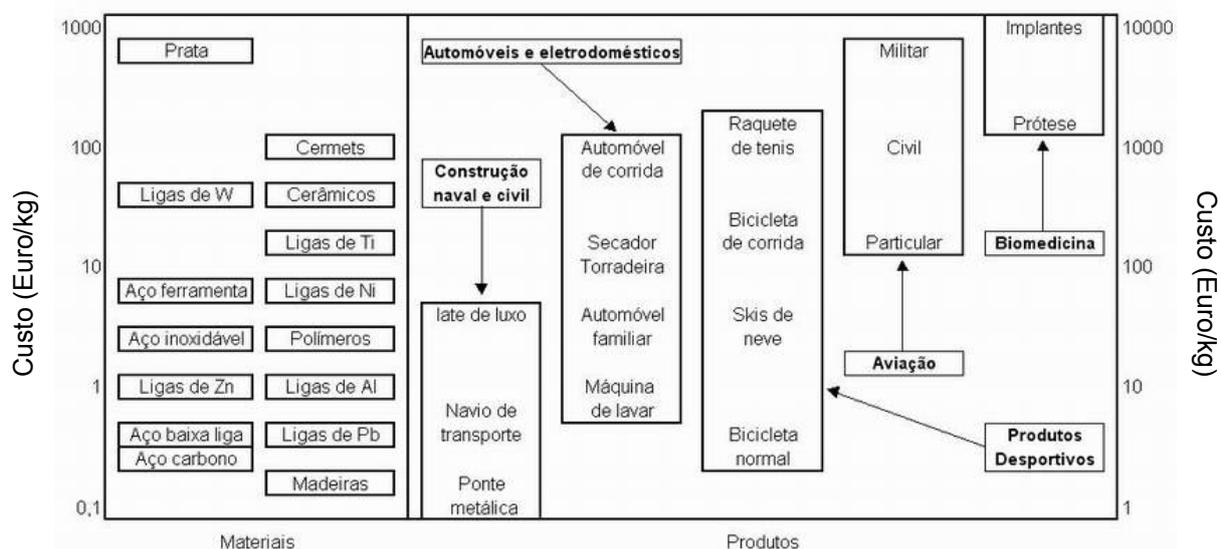


Figura 3. indicação do custo relativo de diversos materiais e do custo relativo de vários bens de consumo representativos de diferentes setores da atividade industrial.⁽⁹⁾

O titânio puro pode se apresentar sob duas formas alotrópicas conhecidas como fase α (hexagonal compacta) e fase β (cúbica de corpo centrado), sendo a fase α estável até a temperatura de 882°C. Em função das fases predominantes a temperatura ambiente as ligas de titânio podem ser classificadas em α , $\alpha+\beta$ ou β . Alumínio, oxigênio, nitrogênio e carbono são fortes estabilizadores da fase α . Molibdênio, vanádio, manganês, cromo e ferro são os principais estabilizadores da fase β . Na liga TiAl6V4 os 6% de alumínio estabilizam a fase α , elevando a temperatura de transformação $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ de 882°C para aproximadamente 984°C. Os 4% de vanádio aumentam a resistência por formarem com o titânio uma solução sólida substitucional, estabilizando a fase β a temperatura ambiente. No resfriamento desde a fase β para o campo $\alpha + \beta$, a fase β metaestável pode se transformar em α tanto por nucleação e crescimento quanto por processos de transformação martensítica. Na temperatura ambiente as fases α e β podem se apresentar com diferentes morfologias, resultando em diferentes propriedades para o material.^(3,10)

3.1 Curvas de Escoamento

Curvas de escoamento foram determinadas, através de ensaio de compressão, para o mesmo material a ser forjado, utilizando corpos de prova cilíndricos com 30 mm de altura e 20 mm de diâmetro. Os ensaios foram executados em uma máquina servo-hidráulica que permite a realização de ensaios com velocidade de deformação constante e altas temperaturas. A Tabela 1 mostra as condições de realização dos ensaios e as equações que descrevem cada curva ajustada na forma do modelo de escoamento de Ludwik-Hollomon. Esse ajuste é necessário para permitir a introdução das curvas no software que é feita pela inserção das constantes C e N do modelo de Ludwik-Hollomon em função da temperatura e da velocidade de deformação. A Figura 4 mostra as curvas originais obtidas experimentalmente. As discrepâncias entre as curvas originais e as efetivamente utilizadas pelo *software* (equações na Tabela 1) apresentam uma média de 11% sendo a discrepância máxima de 45 % para a temperatura de 800°C, velocidade de deformação igual a 10/s e grau de deformação de 0,02.

Tabela 1. Condições de realização dos ensaios de compressão

VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO (1/s)	TEMPERATURA (°C)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
0,1	200	$1046,30 \epsilon^{0,0359}$
	400	$834,15 \epsilon^{0,0264}$
	600	$455,86 \epsilon^{0,0410}$
	800	$143,06 \epsilon^{0,0167}$
	900	$86,46 \epsilon^{0,0386}$
	1000	$46,83 \epsilon^{0,0176}$
1,0	200	$1075,30 \epsilon^{0,0259}$
	400	$904,93 \epsilon^{0,0277}$
	600	$677,31 \epsilon^{0,0417}$
	800	$227,44 \epsilon^{0,0291}$
	900	$126,64 \epsilon^{0,0308}$
	1000	$73,92 \epsilon^{0,0319}$
10,0	200	$1144,10 \epsilon^{0,0238}$
	400	$966,21 \epsilon^{0,0289}$
	600	$808,23 \epsilon^{0,0227}$
	800	$309,39 \epsilon^{0,0259}$
	900	$181,77 \epsilon^{0,0321}$
	1000	$101,95 \epsilon^{0,0284}$

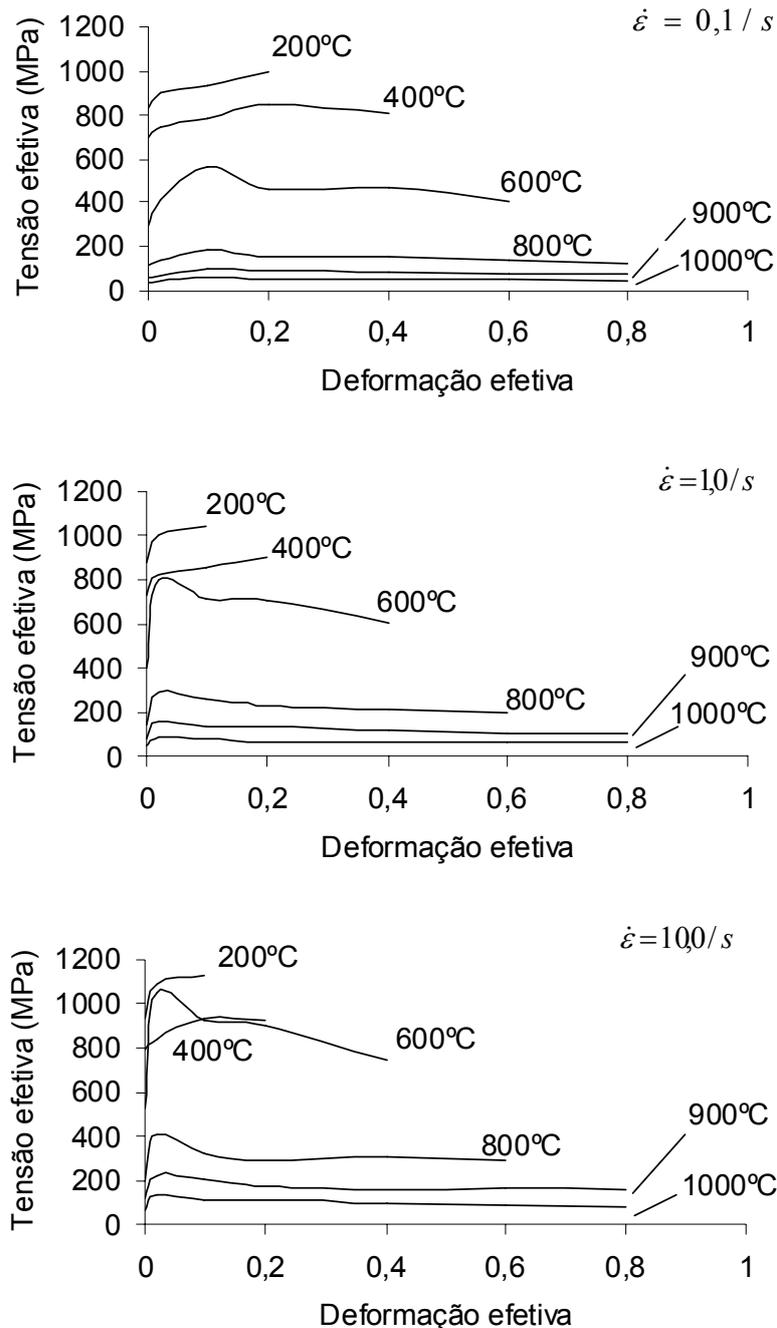


Figura 4. Curvas de escoamento obtidas para a liga TiAl6V4 em diferentes temperaturas e velocidades de deformação.

3.2 Fator de Atrito

Neste trabalho o atrito é descrito através do fator de atrito interfacial e determinado através do teste do anel plano. Para determinação do fator de atrito foram realizados ensaios com anéis de 12 mm de diâmetro externo, 6 mm de diâmetro interno e 4 mm de espessura. Foram realizadas reduções de 30 e 50%. Como o *software* não permite a introdução do fator de atrito em função da temperatura e considerando que durante o ensaio o anel sofre rápido resfriamento os ensaios foram realizados apenas para a temperatura do anel igual a 950°C com a

temperatura das ferramentas igual a 200°C. Os anéis e as ferramentas foram lubrificadas com um produto comercial a base de bissulfeto de molibdênio. A metodologia para execução do ensaio e para determinação do fator de atrito é detalhadamente descrita pelo autores^(1,2) e por esta razão é omitida aqui. Utilizando essa metodologia foi determinado que o fator de atrito é de cerca de $m=0,6$.

3.3 Coeficientes de Transferência de Calor

Os parâmetros térmicos necessários à simulação numérica do processo de forjamento podem ser classificados em dois grupos: propriedades dos materiais e características do processo. Entre os dados dos materiais tem-se a densidade, o calor específico e a condutibilidade térmica. Já os parâmetros do processo dizem respeito aos coeficientes de troca de calor entre o forjado e a matriz, entre o forjado e o ambiente e entre a matriz e o ambiente. Os parâmetros que regem essas trocas térmicas são: (a) emissividade ξ da superfície da peça forjada; (b) coeficiente h de transferência de calor por convecção da peça para o meio ambiente; (c) coeficiente k de transferência de calor por condução da peça para a ferramenta. Utilizando uma metodologia para determinação desses coeficientes térmicos também já descrita pelos autores,^(1,2) aplicada a um corpo de prova da liga TiAl6V4 com 20 mm de diâmetro e 30 mm de altura, inicialmente aquecido a 950°C, foram determinados os seguintes valores: $h = 16,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\xi = 0.4$ e $k = 7000 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4 FORJAMENTO E SIMULAÇÃO

Para o desenvolvimento do processo de forjamento através da simulação foi modelado um conjunto de ferramentas composto por uma matriz inferior e quatro punções superiores, além de *billets* na forma de prismas retangulares com diferentes dimensões. Todo o conjunto é visto na Figura 5. Na Tabela 2 são mostradas as dimensões e o volume dos *billets* utilizados.

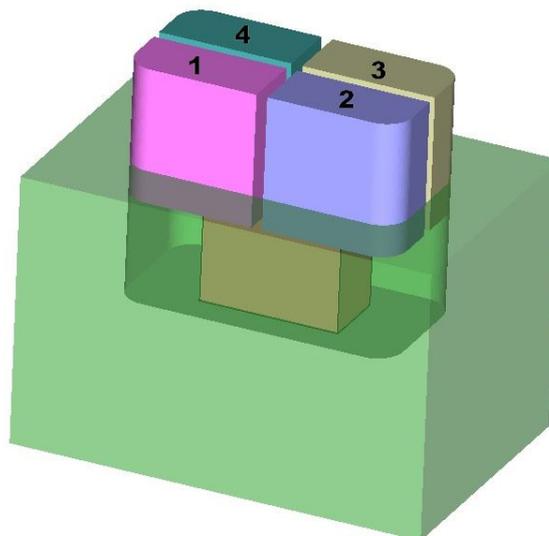


Figura 5. Representação esquemática da matriz, dos punções e do corpo de prova utilizado.

Foram testadas três diferentes formas de aplicação dos punções, a seguir denominados processos “A”, “B” e “C”. O processo “A” consistiu na aplicação dos quatro punções ao mesmo tempo até que fosse atingida a força máxima (400 kN) da

prensa hidráulica utilizada. No processo “B” era feita a aplicação dois punções em diagonal também até que fosse atingida a carga máxima de 400 kN, seguida da aplicação dos dois outros punções também até o limite da prensa. No processo denominado “C”, os punções eram aplicados um a um, na ordem 1-3-2-4 (Figura 5) até uma deformação em altura de 5 mm ou até que a carga máxima da máquina fosse atingida. Conforme o volume, a geometria e o processo utilizado os *billets* e as simulações foram identificados pelos números 30 ou 50 (que indicam o volume), seguidos pelos algarismos romanos “I”, “II” ou “III” (que indicam a geometria inicial), seguidos pelas “A”, “B” ou “C” (que indicam o processo).

Tabela 2. Dimensões dos *billets* utilizados.

Volume (mm ³)	Geometria	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
30000	I	77,00	38,50	10,12
	II	62,00	31,00	15,61
	III	51,00	25,55	23,07
50000	I	77,00	38,50	16,87
	II	62,00	31,00	26,01
	III	51,00	25,55	38,45

Quanto às geometrias finais obtidas não foi encontrada uma boa correlação entre os resultados experimentais e as simulações para todos os casos estudados. Desses diversos casos, apenas a partir dos forjados obtidos nos casos “50-III-A”, “50-III-B” e “50-III-C” é possível usinar a peça final desejada (Figura 1). A Figura 6 mostra esses três casos com as respectivas dimensões obtidas (conforme a figura 1). Por outro lado uma boa correlação entre valores experimentais e calculados foi obtida para curvas força-deslocamento.

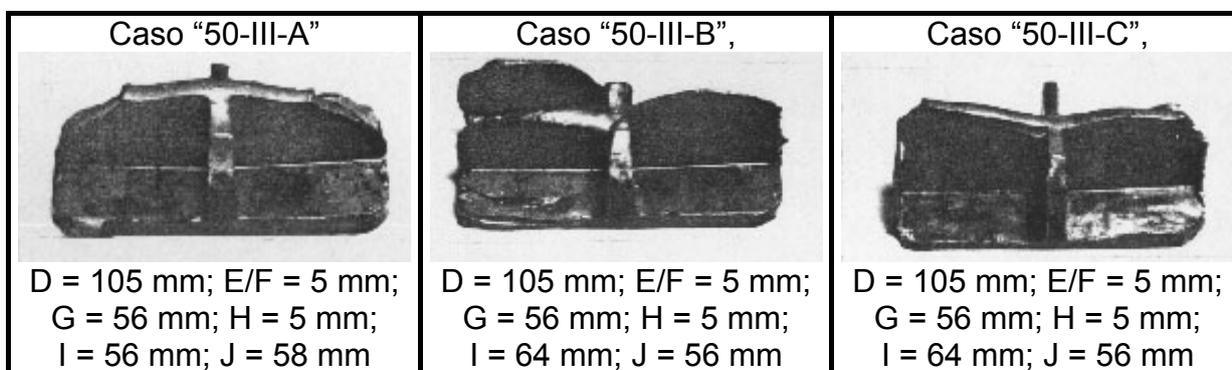


Figura 6. Forjados obtidos a partir dos quais é possível usinar a peça da Figura 1 e respectivas dimensões gerais.

A Figura 7 mostra a primeira e a última seqüência de passes na simulação do forjamento do caso “50-III-C”. A Figura 8 mostra curvas força – deslocamento do punção 1 (simuladas e medidas) no primeiro e último do mesmo caso. Para o caso e “50-III-A” (os quatro punções atuando juntos) foi calculada uma força de 4202 kN para o forjamento da peça.

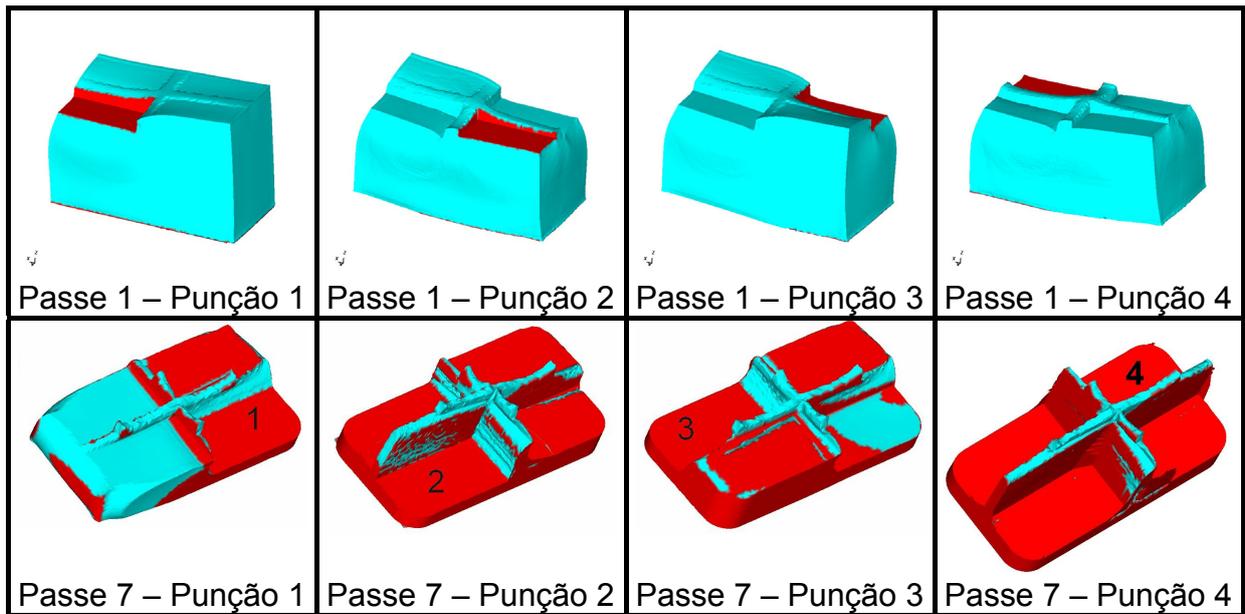


Figura 7. Primeira e última seqüências de passes na simulação do forjamento do caso “50-III-C”; as regiões vermelhas indicam contato com as ferramentas.

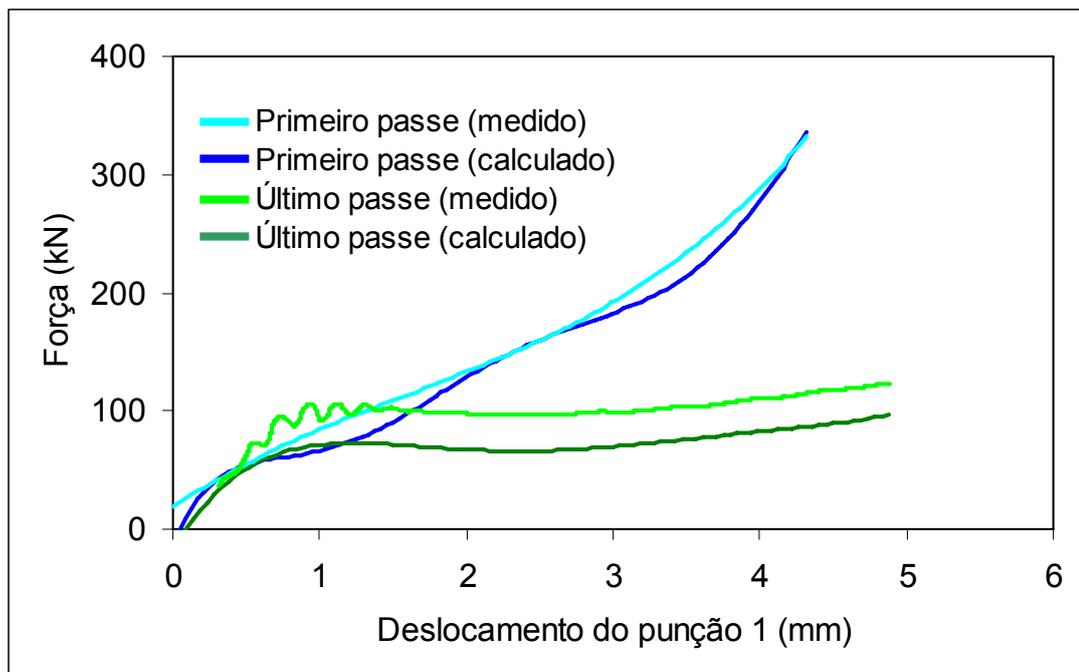


Figura 8. Curvas força – deslocamento (simuladas e medidas) do punção 1 no primeiro e último passe do caso 50-III-C.

4 CONCLUSÕES

Os resultados finais obtidos demonstraram a viabilidade do processo progressivo na produção de peças forjadas a serem usinadas posteriormente. Mais especificamente o processo pode ser uma alternativa para a produção de pequenas séries onde um grande investimento em um ferramental de precisão e uma prensa de grande capacidade não seja justificável.

O processo torna-se tão mais competitivo quando maior for a perda de material caso a peça fosse totalmente produzida por usinagem e quanto maior for o

custo do material. No caso aqui apresentado obtém-se uma redução de material superior a 80%.

Foi também verificado que programas de simulação podem auxiliar no desenvolvimento de projetos de forjamento desde que alimentados com dados adequados

REFERÊNCIAS

- 1 Schaeffer, L.; Brito, A.M.G.; Geier, M.: *Numerical simulation using finite elements to develop and optimize forging processes*. Steel research international, vol. 76, n^o 2/3, p. 199-204, 2005.
- 2 Geier, M; Brito, A.M.G.; Schaeffer, L.: *Otimização de um processo de forjamento pelo método de volumes finitos*. In: anais da 8^o Conferência Internacional de Forjamento, pp. 85-101, Porto Alegre, 2004.
- 3 Brito, A.M.G.; *Forjamento progressivo: processo alternativo para prensas de pequena capacidade*. Dissertação de mestrado, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 1989.
- 4 Abramowitz, P.H.; Schey, J.A.; *Principles of incremental forging*. University of Illinois, College of Engineering, 1970.
- 5 Chitkara, N.R.; Bhutta M.A.: *Forging and heading of hollow spur gear forms: an analysis and some experiments*. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 41, Issue 10, October 1999, Pages 1159-1189.
- 6 Chitkara, N.R.; Bhutta M.A.: *Computer simulation to predict stresses, working pressures and deformation modes in incremental forging of spur gear forms*. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 38, Issues 8-9, August-September 1996, pp. 871-889.
- 7 Liu, G.; Yuan, S. J. ; Wang Z. R.; Zhou D. C.: *Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of a cylinder* . Journal of Materials Processing Technology, Volume 151, Issues 1-3, September 2004, pp. 178-182.
- 8 Standring, P.; *The application of novel bulk metalforming methods for low, medium and high volume production*. In: anais da 8^o Conferência Internacional de Forjamento, pp. 15-28, Porto Alegre, 2004.
- 9 Rodrigues, J.; Martins, P.: *Introdução aos processos de fabrico*. In: *Tecnologia mecânica, tecnologia da deformação plástica, vol. 1, fundamentos teóricos*. Lisboa, Escolar Editora, 2005, cap. 1, p. 6-48.
- 10 Peter, M; Hemptenmacher, J; Kumpfert, J; Leyens, C.; *Titan und Titanlegierungen: Struktur, Gefüge, Eigenschaften*. In: *Titan und Titanlegierungen*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003, cap. 1, p. 3-45.