

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA DUREZA EM LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V FORJADA A QUENTE E TRATADA TERMICAMENTE

Vojciechowski Jr, J.¹

Lima, D. R. S de.²

Medeiros, G. A.³

Wolfart Jr. M.⁴

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Joécio Vojciechowski Júnior, IFC Campus Luzerna, joelciovjunior@gmail.com.

² Doutor em Engenharia – Processos de Fabricação, Diego Rodolfo Simões de Lima, IFC Campus Luzerna, diego.lima@ifc.edu.br.

³ Mestre em Engenharia – Processos de Fabricação, Gianpaulo Alves Medeiros, IFSC Campus Joinville, gianpaulo.medeiros@ifsc.edu.br

⁴ Doutor em Engenharia – Ciência dos Materiais, Mario Wolfart Junior, IFC Campus Luzerna, mario.wolfart@ifc.edu.br

Resumo

Ligas de titânio forjadas apresentam elevada resistência mecânica e baixo peso específico, o que possibilita que essas ligas possuam aplicações em diversos ramos industriais, como o segmento automobilístico e aeroespacial. Apresentam também boa biocompatibilidade, tendo seu uso crescentemente explorado para a obtenção de próteses e materiais biomédicos em geral. Neste artigo é abordada uma análise experimental, realizada na liga Ti6Al4V, caracterizando a evolução da dureza do material ao longo de seu processamento. Foram medidas as durezas obtidas desde as condições iniciais de fornecimento, seguindo a análise após as amostras serem forjadas a quente e, por fim, deformada e tratada termicamente. Os resultados mostram acréscimo considerável de dureza após deformação plástica e ainda maior quando forjada e tratada termicamente, evidenciando o grande potencial de endurecimento dessa liga após processamento.

Palavras-chave: Forjamento a quente, forjamento de liga de titânio, Ti6Al4V.

ESTUDY OF HARDNESS VARIATION OF HOT FORGED AND HEAT TREATED TITANIUM ALLOY Ti6Al4V

Abstract

Forged titanium alloys have high mechanical strength and low specific weight, which enables these alloys to have applications in various industrial sectors, such as the automotive and aerospace segments. They also have good biocompatibility, and their use has been increasingly explored to obtain prostheses and biomedical materials. This paper deals with an experimental analysis, applied on Ti6Al4V alloy, characterizing the hardness evolution of the material processing. The hardness obtained from the initial supply conditions were measured, as was after the samples were hot forged and, finally, measured after deformed and heat treated. The results show a considerable increase in hardness after plastic deformation and even higher

when forged and heat treated, showing the great hardening potential of this alloy after processing.

Key words: hot forging, Titanium alloy forging, Ti6Al4V.

1 INTRODUÇÃO

As ligas de titânio apresentam como característica principal uma alta resistência mecânica, combinada com baixa densidade e boa resistência à corrosão, gerando então, componentes que suportam elevadas forças de trabalho, associado com um baixo peso. Estas, são qualidades buscadas por diversas áreas industriais, sobretudo pela automobilística, aeronáutica, aeroespacial, petrolífera e biomecânica [1].

Quanto à classificação destas ligas, elas se diferem de acordo com as fases existem na microestrutura em temperatura ambiente, podendo ser Alpha (α), Beta (β) ou Alpha + Beta ($\alpha+\beta$). As ligas α apresentam uma estrutura cristalina HC, apresentando boa resistência mecânica e tenacidade, pecando, porém, na conformabilidade. Já as ligas β apresentam boa conformabilidade, devido sua estrutura cristalina ser HCC, com boas qualidades mecânicas para trabalhos a frio, porém, não indicadas para altas temperaturas pela alta vulnerabilidade de contaminação pela atmosfera [1].

Já as ligas $\alpha+\beta$ possuem boa combinação das características mecânicas das duas fases, com a vantagem de serem mais resistentes à oxidação e serem tratáveis termicamente [1]. A liga Ti-6Al-4V é uma das mais importantes neste grupo, devida sua ampla utilização, boa conformabilidade e usinabilidade. Esta, apresenta alto ponto de fusão e alta aplicabilidade na indústria aeroespacial, onde fatores como a resistência à fluência, fadiga e degradação são essenciais, características presentes na liga. Apenas esta indústria consome cerca de 75% do Titânio mundial [2].

Para a produção de peças nesta liga é comum a prática de forjamento, que consiste em um processo de conformação mecânica que imprime uma força de compressão em um material metálico sobre uma matriz, forçando-o assumir a geometria desta. As matrizes podem ser abertas, onde o material escoar livremente sobre as superfícies, ou fechadas, em que o material é envolvido pela matriz, forçando-o sobre suas cavidades [3].

O material pós-conformado é usualmente submetido à tratamentos térmicos, que consistem em operações envolvendo aquecimento e rápido resfriamento, objetivando alterações microestruturais da matéria que concedam aumentos na resistência mecânica, alívio de tensões e aumento da tenacidade. Uma das características do Ti-6Al-4V é a possibilidade de executar estas operações, permitindo melhorias em peças desta liga [2].

Os níveis máximos de resistência mecânica em ligas $\alpha+\beta$ são obtidos através do tratamento térmico de solubilização, seguido por um envelhecimento. Para isso, o material é inserido em um forno previamente aquecido à altas temperaturas, na faixa de transição da fase β , por um curto período de tempo, seguido do resfriamento em água. Após isto, o material é submetido novamente ao forno, em temperaturas mais baixas e por períodos maiores, realizando o envelhecimento do material [4].

Este processo dissolve grandes precipitados intermetálicos, coalescidos e concentrados na matriz metálica, tornando os elementos químicos solubilizados na rede cristalina do titânio. Após resfriado rapidamente, a liga é novamente aquecida, com temperaturas mais baixas e tempos maiores, o que possibilita que os elementos de liga, agora solubilizados, combinem-se entre si, formando precipitados finamente dispersos na rede cristalina da liga de titânio, conferindo ao material ganho de dureza e resistência mecânica, além de incremento na resiliência e tenacidade do material.

Para finalizar o processo produtivo de uma peça desta liga, após a realização do forjamento e tratamento térmico, a mesma é submetida à usinagem, operação que remove material em excesso e permite que a peça final apresente a geometria desejada e a tolerância dimensional necessária para o correto funcionamento.

Explora-se neste artigo um estudo realizado sob a liga Ti-6Al-4V em que esta foi submetida ao forjamento e tratamento térmico, analisando o comportamento da dureza das amostras após os processos descritos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material de trabalho desta pesquisa se trata da liga de titânio $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V, recebida em barras de 25,4 mm (1 polegada) em estado recozido. Esta foi cortada em geratrizes com 42 mm de altura por uma serra-fita. Em sequência, as amostras foram instaladas em um torno mecânico convencional, a fim de se obter geratrizes

com as dimensões adequadas para o processo. Após realizada tais etapas, foram obtidas 6 amostras da liga de titânio Ti-6Al-4V com 40 mm de altura cada.

O processo de forjamento se deu através de matrizes abertas, objetivando-se realizar o recalque das geratrizes, comprimindo-as no sentido da altura e gerando peças com deformações verdadeiras de 0,5 e 0,8, valores dentre os utilizados comumente em indústrias do ramo de conformação mecânica.

Através de cálculos utilizando a equação (1), obteve-se que as alturas finais das geratrizes forjadas para as deformações de 0,5 e 0,8 deveriam ser de 26 mm e 17 mm, respectivamente. Para que o processo ocorresse de forma precisa, foram usinados através do torneamento 2 pares de batentes de aço ABNT 1020, com as devidas alturas para cada processo.

$$\varphi = \ln \frac{h}{h_0} \quad (1)$$

Onde φ representa a deformação verdadeira Onde φ representa a deformação verdadeira do material , h e h_0 são as alturas final e inicial, respectivamente.

Em sequência, 5 *billets* de Ti-6Al-4V foram inseridos em um forno Jung J-100 à temperatura de 995°C, correspondente à temperatura de transição da fase *beta*, por 1 hora. Este processo tem fim de aumentar a conformabilidade do material, caracterizando-o como um forjamento a quente.

As matrizes utilizadas para o processo se tratam de dois cilindros retos do aço H13, material recomendado para a produção de peças forjadas a quentes. O ferramental foi instalado em uma prensa hidráulica Hidraumak com capacidade de força de 2000 kN e aquecido com bico de gás, que incidiu chama proveniente de gás GLP por 30 min, diretamente nas superfícies das matrizes, como mostra a figura 01. Como parâmetros da prensa, foram utilizadas 2000 kN de força, com uma velocidade de máquina de aproximadamente 20 mm/s.

Realizada tais preparações, dois batentes foram instalados na matriz e se deu início ao forjamento do lote. Cada peça foi retirada rapidamente do forno (que está localizado adjacente à prensa) e postos no centro da matriz. O tempo entre o processo de transporte da geratriz até a prensa e início do forjamento foi de aproximadamente 4 segundos. Após realizado dois testes com os batentes de 26

mm de altura, estes foram trocados pelos batentes de 17 mm e dado sequência no processo. As peças recalçadas geraram 2 amostras com uma deformação verdadeira igual à 0,54 e duas com deformação verdadeira de 0,85.



Figura 01. Aquecimento da Matriz

Do par de amostras de cada deformação, uma foi tratada termicamente e caracterizada, enquanto a outra foi caracterizada imediatamente após o forjamento. O tratamento térmico empregado consistiu em solubilização por 1 hora à 950°C, seguido pelo resfriamento em água. Após, foi realizado o envelhecimento em uma temperatura de 430°C por 4 horas, utilizando novamente a água como meio de resfriamento. O processo resultou então em 6 amostras, como descreve a tabela 1:

Tabela 1: Amostras com os processos submetidos

Amostra	Estado
#1	Recozido, sem forjamento
#2	Tratada termicamente, sem forjamento
#3	Forjada com deformação de 0,540 sem tratamento térmico
#4	Forjada com deformação de 0,540 com tratamento térmico
#5	Forjada com deformação de 0,855 sem tratamento térmico
#6	Forjada com deformação de 0,855 com tratamento térmico

As amostras foram então cortadas e embutidas em baquelite, através de uma embutidora metalográfica, seguida pela preparação de amostras com

sequência de lixas de gramaturas 100, 200, 320, 400, 600 e 1200. Por fim, executou-se o polimento em panos, embebidos com pasta de diamante de 3 μ m e 1 μ m.

Os testes para medir a dureza foram realizados em um durômetro em escala Vickers, da marca com uma carga de 0,49 N de força, por um tempo de 10 segundos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de dureza obtidos nas diferentes amostras, em escala Vickers, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Resultados do teste de Dureza Vickers

Amostra	Média (HV)
# 1 - Recozida, sem forjamento	302,3
#2 - Tratada termicamente, sem forjamento	352,8
#3 - Forjada com deformação de 0,54 sem tratamento térmico	357,9
#4 - Forjada com deformação de 0,540 com tratamento térmico	382,4
#5 - Forjada com deformação de 0,855 sem tratamento térmico	355,5
#6 - Forjada com deformação de 0,855 com tratamento térmico	375,1

Pelos resultados obtidos, é possível constatar o aumento de dureza adquirido pelas amostras, ao longo das etapas incrementais de processamento. Das amostras não tratadas termicamente, nomeadamente as amostras #1, #3 e #5, respectivamente a matéria-prima não deformada, a geratriz deformada a 0,54 e a geratriz de 0,85 de deformação, pode-se perceber que a deformação conferiu um aumento de dureza na matéria-prima da ordem de 18,4% para a deformação menor e 17,6% para a deformação maior imposta na peça.

Esse aumento de dureza após deformação é coerente com a formação de encruamento de grão e possibilidade de formação de textura mecânica nas peças recalçadas. Neste experimento, o aumento de deformação manteve praticamente constante o incremento de dureza, enquanto o esperado era de que, quanto maior a deformação, maior o endurecimento conseguido. Essa manutenção da dureza,

inclusive com sutil redução deste em números absolutos, pode indicar a formação de recristalização de grãos ou aumento da fração recristalizada, decorrente do também aumento da deformação imposta. Um ensaio metalográfico pode confirmar ou refutar esta teoria e será uma das próximas etapas do projeto que abriga o presente artigo.

Em relação ao tratamento térmico, ao se comparar a amostra #1, não deformada e não tratada termicamente, com a amostra #2, não deformada e tratada termicamente, pode-se observar um significativo aumento de dureza, da ordem de 16,7%. Este tratamento térmico imposto, conforme já apresentado, objetiva a formação de precipitados finamente dispersos na microestrutura da liga. Pelos resultados encontrados da caracterização da dureza, é esperado que foi obtido a dispersão de precipitados desejada. No entanto, novamente, será necessária uma análise metalográfica para avaliar a quantidade e morfologia dos precipitados, para se confirmar as indicações de causa e efeito.

A condição que maior incremento de dureza apresentou é a que concilia a deformação imposta pelo forjamento com o tratamento térmico posterior. Esta combinação é encontrada nas amostras #4 e #6, que respectivamente apresenta deformações verdadeiras impostas de 0,54 e 0,85, seguidas de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial. Nestas condições, a amostra de menor deformação, após tratamento térmico, apresentou um acréscimo de dureza de 26,5%, ao passo que a amostra com maior deformação imposta teve um acréscimo de dureza 24,1%. Estes resultados se mantiveram coerentes com aqueles obtidos após a deformação e antes do tratamento térmico, onde as deformações impostas apresentaram resultados de dureza semelhantes, com suave diminuição para o caso da maior deformação, o que, aqui também, suspeita-se de aumento da fração de grãos recristalizados pelo trabalho termomecânico.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta valores de dureza que evoluem positivamente em relação a matéria-prima, quando se submete as peças a deformação no processo de forjamento e, ainda mais, após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial.

O tratamento térmico empregado neste trabalho se mostrou eficiente para incremento de dureza, tanto em peças deformadas, quanto em peças não deformadas.

A deformação também apresentou influência no aumento de dureza da peça, em relação a matéria-prima, no entanto, não se pode fazer uma correlação direta entre aumento de deformação e aumento de dureza, provavelmente devido a fenômenos de recristalização que são mais presentes quanto maior a deformação aplicada às peças no processo a quente.

Para trabalhos futuros, faz-se necessária uma análise metalográfica para se avaliar a fração de grãos recristalizados do material e confirmar as suspeitas para a suave diminuição de dureza das peças, quando se aumentou a deformação aplicada. Igualmente, a análise metalográfica pode ser importante para validar a formação de precipitados finamente dispersos na microestrutura do material, obtidos após tratamento térmico.

Agradecimentos

Este projeto é financiado com recursos do Instituto Federal Catarinense – campus Luzerna, o qual agradecemos.

REFERÊNCIAS

- 1 KNOLL, P.K., SCHAEFFER, L.. Análise Microestrutural da Liga de Titânio $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V, Forjada à Quente. 17°CBECEMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2006.
- 2 SUGAHARA, T., MOURA NETO, C., REIS, D.A.P., PIORINO NETO, F. Caracterização Mecânica e Microestrutural da Liga Ti-6Al-4V Tratada Termicamente. Revista Brasileira de Aplicações a Vácuo, São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.
- 3 SCHAEFFER L. Forjamento. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre; 2001.
- 4 DONACHIE, M. J. Titanium: A Technical Guide. ASM International. Materials Park, Ohio, United States of America, 2000.