

CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA MICRODUREZA VICKERS NO PROCESSO DE FORJAMENTO DE ALUMÍNIO

Diego Rodolfo Simões de Lima*, Charles Chemale Yurgel, Lirio Schaeffer
Engº de Materiais, Pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM / EE / UFRGS.

RESUMO

Este trabalho concentra-se na caracterização da evolução da dureza obtida no processo de fabricação de componentes de alumínio da liga AA6351, através de forjamento à quente. São retiradas amostras da geratriz não-conformada, da peça imediatamente após o forjamento e da peça forjada após tratamento térmico T6. Estas amostras são submetidas a ensaio de microdureza Vickers e é traçado um gráfico evolutivo da dureza da liga de alumínio durante todo o processo. Notou-se que a peça conformada apresentou aumento de dureza médio de 35 % e que a peça termicamente tratada obteve aumento de dureza médio de 125 % ambos em relação à matéria-prima. Percebeu-se que ocorre variação na dureza ao longo do perfil da peça, sendo maiores durezas encontradas em regiões da peça com maior deformação plástica. É apresentado ainda o ferramental utilizado no forjamento.

Palavras-chaves: alumínio forjado, AA 6351, dureza Vickers.

1. Introdução

O alumínio é atualmente o segundo metal mais consumido pela engenharia, ficando apenas atrás do ferro e do aço, conforme definiu Smith⁽¹⁾. Tal consumo é explicado pelas propriedades apresentadas por este material, que possui um favorável baixo peso específico e consegue, em algumas ligas, igualar a resistência mecânica dos aços estruturais. O alumínio traz vantagens consideráveis em algumas aplicações devido a sua boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência à corrosão e aparência estética favorável.

Segundo Zitz⁽²⁾, ao longo dos últimos 20 anos o consumo de alumínio mais que triplicou em aplicações automotivas, conforma retrata a figura 1.

* **Correspondência ao autor:** Tel: +55 51 3308 6134 Fax: +55 51 3308 6134
Endereço de e-mail: diego.lima@ufrgs.br

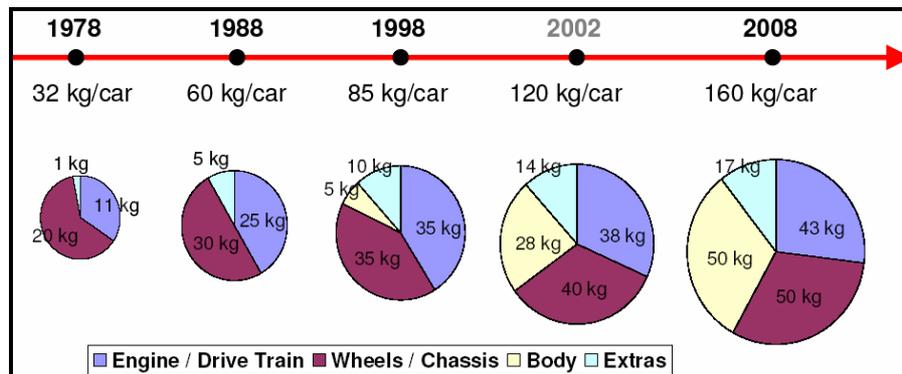


Figura 1 – Evolução do consumo de alumínio em aplicações automobilísticas⁽³⁾.

Segundo o *International Aluminium Institute*, a produção mundial de alumínio primário em 2003 foi de 21 milhões de toneladas, sendo os EUA o maior produtor, mesmo sem possuir jazidas de bauxita em seu território.

O mercado brasileiro segue a mesma tendência mundial de crescimento no consumo de alumínio. Em entrevista a revista *Alumínio*⁽⁴⁾, Luis Carlos Loureiro Filho, presidente da ABAL (Associação Brasileira de Alumínio), divulgou que, no ano de 2005, foram consumidas 729 mil toneladas de alumínio, registrando um crescimento no consumo de 7% em relação a 2004, que já havia registrado 11,3% de crescimento em relação a 2003.

O potencial do mercado de alumínio no país é imenso, já que o consumo nacional de alumínio é de 4,0 kg/habitante/ano, enquanto que nos países desenvolvidos o consumo é de 28 kg/habitante/ano, muito embora o Brasil possua a 3ª maior reserva natural de bauxita do mundo e atualmente é o 2º maior produtor mundial deste minério.

Ainda segundo a revista *Alumínio*⁽⁴⁾, o setor investe anualmente, apenas no Brasil, cerca de R\$ 1,5 bilhão e o país deve fechar o ano de 2005 com US\$ 3,0 bilhões em exportações. No entanto, 8 em cada 10 kg de alumínio exportado pelo Brasil correspondem a alumínio bruto, configurando-se como um desafio ao setor o desenvolvimento e a exportação de produtos com maior valor agregado em preços competitivos globalmente.

2. Considerações sobre dureza e ensaios de determinação

CHICOT, D.⁽⁵⁾, *et.al*, define dureza de um material como a resistência a deformação plástica de um material quando um indentador é aplicado sobre ele. O princípio geral da

identação consiste em aplicar uma carga conhecida e padronizada sobre a superfície lisa de um material e posteriormente medir a deformação plástica residual. Várias são as técnicas de medição de dureza, entre as quais podem ser destacadas as escalas Rockwell, Brinell e Vickers.

A dureza Rockwell é hoje a técnica de medição de dureza mais utilizada no mundo pela facilidade e rapidez de sua execução, isenção de erros humanos, facilidade de detecção de pequenas diferenças de dureza e pequeno tamanho da impressão⁽⁶⁾. Inicialmente, aplica-se uma pré-carga para firmar o material e na seqüência é imposta a carga propriamente dita. O penetrador pode variar de um cone de diamante (mais utilizado) a uma esfera. A carga é aplicada por um tempo de aproximadamente 10 segundos, de onde é retirada e mede-se então, automaticamente, a profundidade da impressão gerada.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado de diâmetro conhecido, sob uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio da aplicação de uma força determinada por um tempo pré-estabelecido, formando uma calota esférica permanente na superfície do material⁽⁷⁾. Essa calota é então medida com o auxílio de uma lupa graduada, e o valor obtido é confrontado com uma tabela para a determinação da dureza do material em escala Brinell.

O ensaio de dureza Vickers, o indentador é uma pirâmide de base quadrada, que registra na superfície da peça uma marca losangular, com ângulo de 136° entre dois vértices opostos⁽⁸⁾. Posteriormente, relaciona-se a carga aplicada com o tamanho da impressão, tal qual a escala Brinell. É apontado como a escala mais completa, devido a sua abrangência ser a maior entre todas as escalas de dureza, além de permitir resultados em escala contínua e grande precisão na determinação dos resultados. A figura 2 ilustra uma indentação originada de ensaio de dureza Vickers em aço inoxidável austenítico⁽⁹⁾.

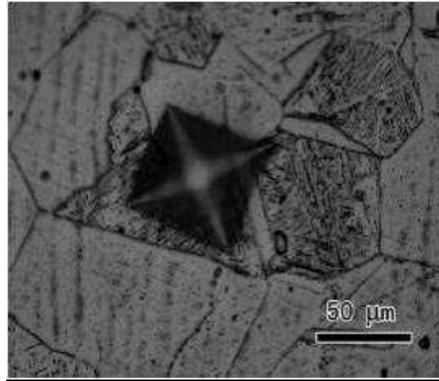


Figura 2 – Micrografia revelando uma identificação de teste de dureza Vickers em aço inoxidável.

3. Procedimento experimental

Neste trabalho, forjou-se a liga de alumínio AA6351, em uma matriz fechada (figura 3), sendo o processo realizado a quente. A geratriz (figura 4) utilizada foi uma barra cilíndrica, de 14 mm de diâmetro e 280 mm de comprimento, a qual foi devidamente dobrada em uma pré-forma curva.

As geratrizes foram aquecidas em forno mufla a uma temperatura de 450 °C durante 15 minutos. A matriz foi aquecida por incidência de chama através de maçarico, durante um período de 3 horas, onde se alcançou uma temperatura de 180 °C na superfície da matriz, valor determinado por termopar de contato tipo K.



Figura 3 – Matriz de forjamento



Figura 4 – Geratrizes empregadas no processo

Como lubrificante do processo, utilizou-se o lubrificante gráfitico AeroDag G, em forma de spray, o qual foi aplicado na matriz e nas geratrizes. Para a conformação, empregou-se uma prensa hidráulica com capacidade de 7000 kN (figura 5).

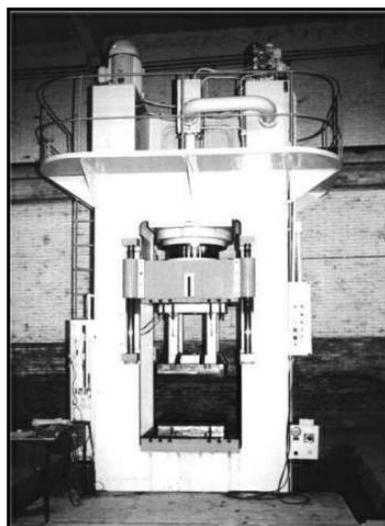


Figura 5 – Prensa hidráulica utilizada.

Após o forjamento, algumas peças foram tratadas termicamente com tratamento T6 (figura 6) em forno tipo poço, com circulador de atmosfera, para se evitar gradientes de temperatura. Aplicou-se às peças solubilização em temperatura de 505 °C, com exposição de 15 minutos, seguido de resfriamento em água. Na seqüência, as peças sofreram um

tratamento de envelhecimento, sendo aquecidas a 170 °C por um tempo de exposição de 6 horas, seguido de resfriamento ao ar livre.

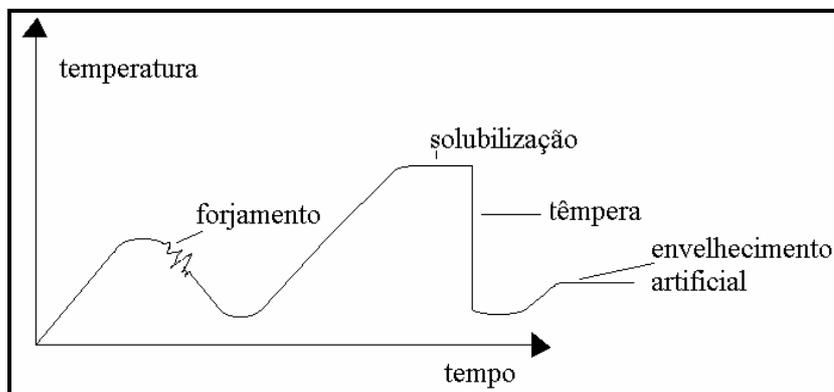


Figura 6 – Tratamento térmico T6.

Ao fim do processo de conformação, foram selecionadas 3 amostras retiradas em 3 diferentes etapas do processo (tabela 1): Uma amostra da matéria-prima não deformada, seguida de amostra da peça após conformação (região lateral) e por fim outra amostra da peça após conformação e tratamento térmico (região lateral).

Tabela 1. Denominação das amostras.

Amostra	Descrição
1	Matéria-prima não deformada
2	Peça forjada – Região lateral
3	Peça após t ^o t° - Região lateral

Estas amostras foram submetidas a ensaio de microdureza em escala Vickers, com carga de 50g e tempo de 15 segundos, utilizando o equipamento ilustrado na figura 7. Cada amostra foi caracterizada por 10 pontos de microdureza, ao longo da secção transversal da peça, conforme representada pela figura 8:



Figura 7 – Microdurômetro Vickers

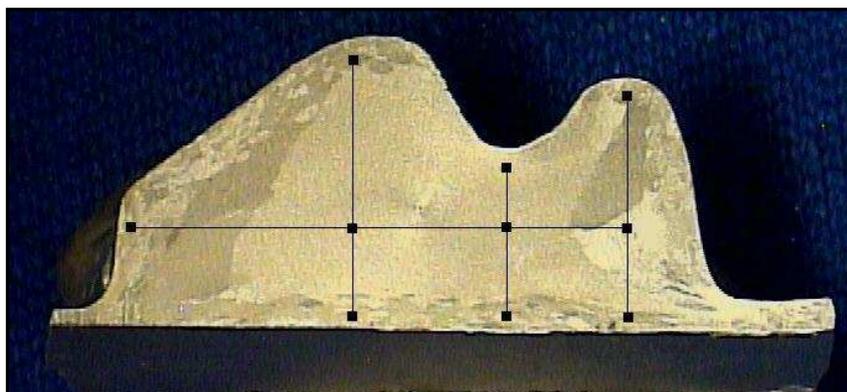


Figura 8 – Distribuição dos pontos de microdureza na secção da peça.

4. Resultados e discussões

Após medição da dureza em escala Vickers, chegou-se aos resultados indicados na tabela 2 através de média aritmética de 10 pontos de dureza distribuídos ao longo do perfil das amostras:

Tabela 2 - Durezas obtidas.

Amostra	1	2	3
Dureza (HV)	51	69	115
Desvio Padrão	2,8	2,9	3,1

Analisando-se a tabela 2, pode-se notar o aumento de dureza conferido ao material nas etapas do processo de conformação. A matéria-prima, que caracterizada no estado recozido apresentou dureza de 51 HV, passou a 69 HV após ser forjada à quente, com um incremento de dureza da ordem de 35,3 %. A máxima deformação verdadeira obtida pela peça no processo de forjamento foi de $\phi = 0,57$, o que é uma deformação relativamente elevada e que pode explicar esse significativo aumento de dureza do material.

Após ser tratada termicamente, a peça adquiriu então dureza final de 115 HV, representando um acréscimo de dureza de 66,6 % em relação à peça conformada sem tratamento. Este aumento de dureza é explicado pela formação de partículas de segunda fase, que se formam durante o envelhecimento da liga de alumínio. Esta fase são precipitados finamente dispersos na matriz do alumínio e, para essa liga, os espécimes mais importantes são formações de Mg_2Si , como pode ser visto na figura 9, após preparação metalográfica e ataque com o reagente Keller.

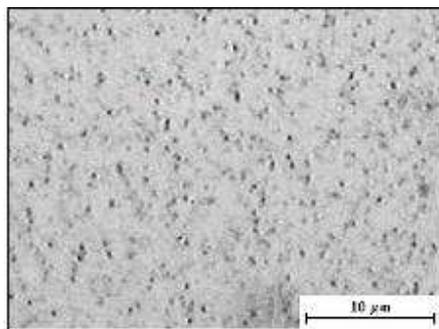


Figura 9 – Microestrutura da liga AA6351 após tratamento térmico T6. Reagente Keller.

Segundo dados retirados do *ASM Metals Handbook*⁽¹⁰⁾, a dureza esperada para a liga AA 6351 após tratamento térmico T6 é de 95 HB ou 107 HV. Obtendo-se um resultado experimental de 115 HV após o tratamento térmico, observa-se uma dureza mais elevada do que aquela indicada por (10).

5. Conclusões

Observou-se neste estudo um aumento de dureza da liga de 35,3 % da matéria-prima em relação à peça forjada. O processo de recristalização no forjamento à quente é o maior responsável por este aumento de dureza.

Da mesma forma, o aumento de dureza da matéria-prima em relação a peça tratada foi de 125,5 %. Esse endurecimento se deu pela formação de precipitados na liga.

O tratamento térmico efetuado nas peças foi satisfatório, já que ultrapassa os dados obtidos na literatura consultada.

Agradecimentos

São deixados agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio financeiro aos projetos de forjamento do laboratório de Transformação Mecânica (LdTM/UFRGS).

Referências

- ¹ SMITH, W. *Structure and properties of engineering alloys*. New York, 1993.
- ² ZITZ, U. Die forged engine and automotive components from high performance aluminum. SENAFOR, XXVI, Porto Alegre, 2006. *Anais do congresso*.
- ³ VDI Nachrichten 29. August 2003 Nr 35. **Cit in.** ZITZ, U. Die forged engine and automotive components from high performance aluminum. SENAFOR, XXVI, Porto Alegre, 2006. *Anais do congresso*.
- ⁴ LOUREIRO FILHO, L. C., CARDOSO, J. O. Por um Brasil mais competitivo, *Revista Alumínio*, número V, ano II, 4 ° trimestre de 2005, pg 14-16.
- ⁵ CHICOT, D., MERCIER, D., ROUDET, F., SILVA, K., STAIA, M. H., LESAJE J. Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurement on various soft materials and hard ceramics. Journal of the Europe Ceramic Society, 2006. Disponível em www.sciencedirect.com

⁶ Tele Curso 2000. Cursos Profissionalizantes – Ensaio, aula 12. Editora globo. Disponível na página da biblioteca virtual da Universidade de São Paulo em

http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/ensaios/ensal2.pdf

⁷ Tele Curso 2000. Cursos Profissionalizantes – Ensaio, aula 11. Editora globo. Disponível na página da biblioteca virtual da Universidade de São Paulo em

http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/ensaios/ensal1.pdf

⁸ MKADDEM, A.,BAHLOUL, R., SANTO, P. D., POTIRON, A. Experimental characterization in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique. Journal of Materials Processing Technology, 180, pg 1-8, 2006.

⁹ YE, D. Investigation of cyclic deformation behavior in the surface layer of 18Cr-8Ni austenitic stainless steel based on Vickers micro hardness measurement. Materials Chemistry and Physics, 93, pg 495-503, 2005.

¹⁰ ASM METALS HANDBOOK, Vol 2, *Properties and selection: Nonferrous Alloys and Specials-Purpose Materials*, pg. 195, 10ª Edição, 1990.