



DIEGO RODOLFO SIMÕES DE LIMA

## Avaliação da pré-forma para forjamento em liga de alumínio

A utilização crescente de produtos em alumínio alavanca diversos estudos para otimização dos processos produtivos. A correta definição das características das geratrizes contribui significativamente para o melhor desempenho técnico do processo de forjamento de produtos em alumínio, resultando ainda na redução dos custos de produção.

O alumínio é atualmente o metal que mais ganha espaço em aplicações mecânicas, devido principalmente às propriedades de baixo peso específico e alcançando, em algumas ligas, a resistência mecânica dos aços estruturais. Além disso, este metal possui boa condutividade térmica e elétrica, alta resistência à corrosão e aparência estética favorável.

Ao longo dos últimos 20 anos o consumo de alumínio mais que triplicou em aplicações automotivas [1], conforme demonstrado nos gráficos da Figura 1. No mercado

brasileiro também se registra um crescimento no consumo deste metal. No ano de 2005, foram consumidas 729 mil toneladas de alumínio, registrando-se um crescimento no consumo de 7% em relação a 2004, que já havia registrado 11,3% de crescimento em relação ao ano anterior [2].

O potencial do mercado de alumínio no país é imenso, já que o consumo nacional é de 4 kg/habitante/ano, enquanto que nos países desenvolvidos atinge 28 kg/habitante/ano. O setor investe anualmente no Brasil, cerca de R\$ 1,5

bilhão e as exportações atingiram em torno de U\$ 3 bilhões apenas no retraído ano de 2005 [2].

No entanto, as exportações ainda são basicamente focadas no material bruto, representando 8 em cada 10 kg de alumínio exportado pelo Brasil. Desta forma, um desafio ao setor é desenvolver e exportar produtos com maior valor agregado em preços competitivos globalmente.

### CONSIDERAÇÕES SOBRE O FORJAMENTO DE ALUMÍNIO

O alumínio e suas ligas podem ser forjados de três formas quanto ao tipo de ferramental [3]:

1. Forjamento de matriz aberta ou *hand forging* - utilizado para geometrias de baixa complexidade, como perfis retos ou curvos e blocos;
2. Forjamento em matriz fechada ou *die forging* - aplicado para geometrias de média complexidade, caracterizadas pela existência de linha de partição da matriz inferior com a superior e;

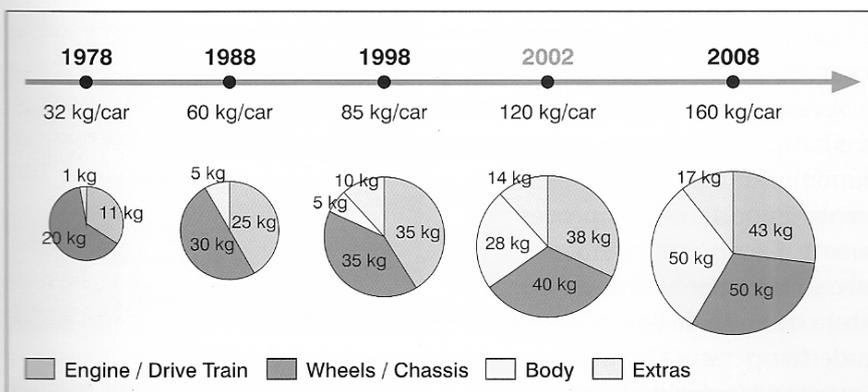


Figura 1 - Evolução do consumo de alumínio em aplicações automobilísticas

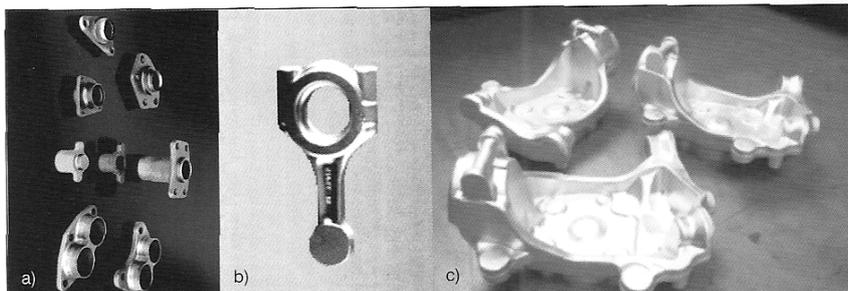


Figura 2 - Peças forjadas em alumínio: (a) Pequenas peças em matriz fechada, (b) biela em matriz bi-partida, (c) peças de motocicletas em matriz de precisão

3. Forjamento em matriz de precisão ou *precision forging* - utilizado em forjados de alta complexidade, caracterizados por múltiplas linhas de partição, com a peça final praticamente isenta de rebarbas.

Atualmente, podem-se obter peças de alumínio forjado com geometria extremamente complexa com bons resultados utilizando-se uma combinação de diferentes tipos de matrizes [4].

A Figura 2 mostra peças obtidas por forjamento de ligas de alumínio.

A lubrificação no processo de forjamento tem como principal finalidade diminuir o atrito e com isso reduzir a força necessária para a conformação da peça e o desgaste do ferramental. Para forjamento a quente de ligas de alumínio, o lubrificante deve ser constituído de uma solução a base de grafite + água ou grafite + óleo [5]. Ainda existe a possibilidade de se lubrificar as ferramentas com adições de sabão, talco ou ceras quando a gravura da matriz tiver geometria complexa [6].

A deformação do material durante o processo de conformação tem influência determinante quando o processo é realizado a frio. Enquanto se aumenta a deformação do material, eleva-se também a resistência ao escoamento do mes-

mo. Devido à recristalização do material, quando o processo é realizado a quente, a deformação perde parte de sua importância, sendo que, neste caso, a velocidade de deformação se torna o parâmetro mais importante [7].

Durante um processo de conformação, quase toda a energia despendida é transformada em calor [8]. A expressão abaixo propicia quantificar o aumento da temperatura que ocorre durante uma operação de forjamento:

$$\Delta\vartheta (^{\circ}\text{C}) = \frac{kf(\varphi, \dot{\varphi}, \vartheta) \cdot \varphi}{C \cdot \delta}$$

Onde:

$\vartheta$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$kf$  = tensão de escoamento em função da deformação ( $\vartheta$ ), da velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ) e da temperatura ( $\vartheta$ )

$C$  = calor específico ( $\text{J/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta$  = massa específica ( $\text{g/m}^3$ )

A velocidade de deformação para o caso de forjamento de ligas de alumínio é um parâmetro extremamente importante no processo a quente. Como as temperaturas empregadas são próximas da temperatura de fusão da liga, o incremento de temperatura causada no forjamento em velocidades altas, pode originar em determinados locais na

peça um excessivo aumento de temperatura [8]. Neste caso, pode ocorrer fusão e, ao se resfriar a peça, tem-se nestes locais uma estrutura bruta de fusão, podendo trazer defeitos de solidificação, como rechupe [9]. Desta forma, se deve controlar o processo para que em nenhum local na peça sejam alcançadas fases líquidas.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, forjou-se a liga de alumínio AA6351, em uma matriz fechada (Figura 3), sendo o processo realizado a quente, obtendo-se como peça de trabalho ferraduras para uso esportivo.

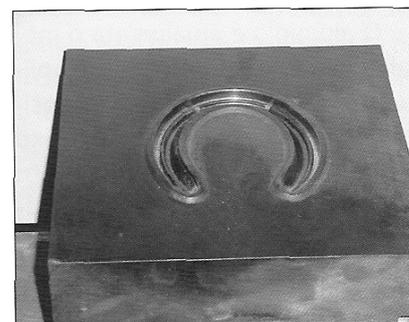


Figura 3 - Matriz empregada no forjamento

Foram testadas duas geratrizes<sup>1</sup> (pré-formas) com variações geométricas. A primeira, sendo dobrada em forma de "U" simples, com raio de curvatura de 50 mm (Figura 4). A segunda, dobrada em dispositivo específico, resultando em forma com raios idênticos ao da peça forjada (Figura 5). Ambas as geratrizes partiram de uma barra cilíndrica, de 14 mm de diâmetro e 280 mm de comprimento.

A dobra da primeira pré-forma foi realizada com uma calandra mecânica (Figura 6) com eixo de do-

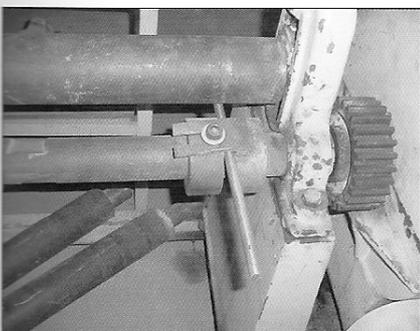
<sup>1</sup> Geratriz: volume de matéria-prima bruta que será utilizada como ponto de partida para o forjamento.



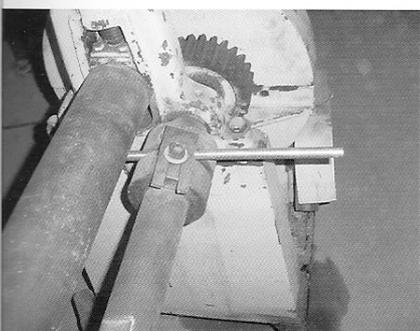
Figura 4 - Geratriz em forma de "U"



Figura 5 - Geratriz em forma de ferradura



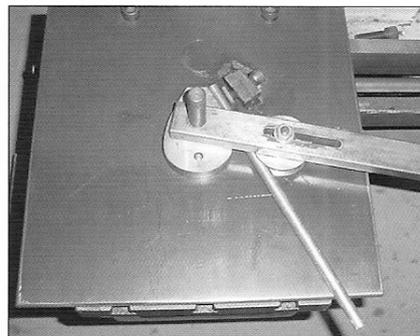
a)



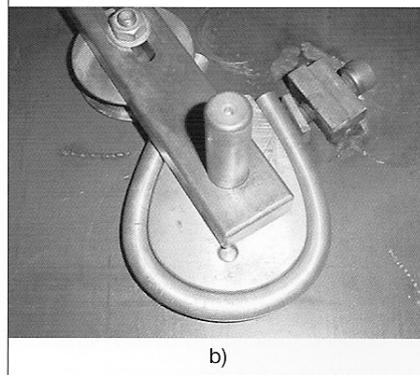
b)

Figura 6 - Calandra mecânica (a) vista frontal, (b) vista lateral

bramento de 50 mm, enquanto que para a segunda geratriz desenvolveu-se um dispositivo de dobramento com inserto de forma geométrica próxima a da peça final, respeitando-se, em projeto, 10% de retorno elástico da barra de alumínio nas extremidades da pré-forma. Através de um sistema de alavanca, a barra foi fixada em uma extremidade do inserto e forçada manualmente em torno do mesmo, dobrando-a conforme ilustra a Figura 7.



a)



b)

Figura 7 - Dispositivo para dobramento das geratrizes: (a) início do dobramento, (b) final do dobramento

Ambas as geratrizes foram aquecidas em forno mufla<sup>2</sup> a uma temperatura de 450°C durante 15 minutos. A matriz foi aquecida por incidência de chama através de maçarico (Figura 8), durante um período de 3 horas, atingindo uma temperatura de 180°C na superfície, valor determinado por termopar de contato tipo K.

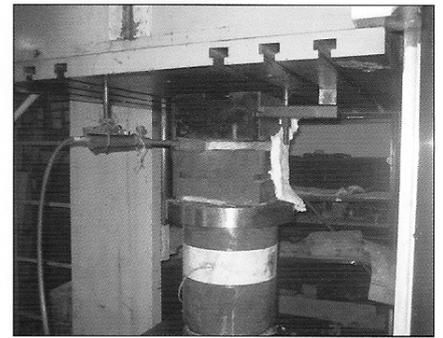


Figura 8 - Aquecimento da matriz

As pré-formas foram lubrificadas utilizando-se o lubrificante gráfitico *Delta Forge 31*, da empresa *Acheson* procedendo-se um pré-aquecimento das mesmas a uma temperatura de 200°C, seguido de posterior mergulho das geratrizes na solução lubrificante (Figura 9). A

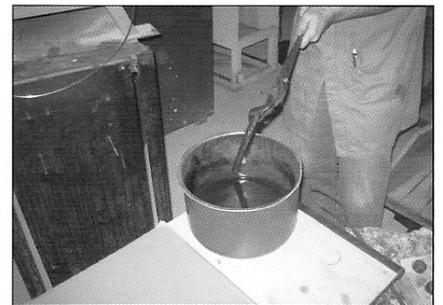


Figura 9 - Lubrificação das geratrizes

matriz foi também lubrificada, com o gráfitico *Aerodag G*, também da *Acheson* em forma de *spray*, que foi borrifado imediatamente antes do forjamento.

Na conformação, empregou-se uma prensa hidráulica de capacidade máxima de 7.000 kN, na qual foi acoplada uma célula de carga para medição da força aplicada e um sensor de deslocamento tipo extensômetro<sup>3</sup> de contato. Os da-

<sup>2</sup> Mufla: estufa para altas temperaturas usada em laboratórios. Consiste basicamente de uma câmara metálica com revestimento interno feito de material refratário e equipada com resistências capazes de elevar a temperatura interior a valores acima de 1.000°C.

<sup>3</sup> Extensômetro: equipamento capaz de medir deformações de corpos.

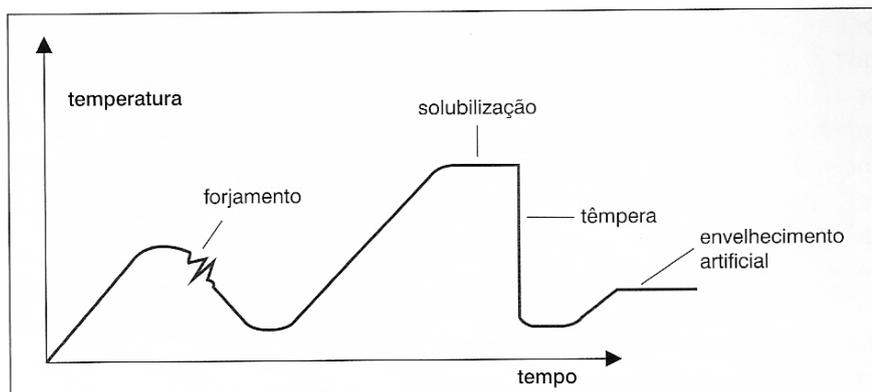


Figura 10 - Tratamento térmico T6 imposto às peças

dos foram captados pelo aparelho Spider 8 e tratados pelo programa Catman.

Após o forjamento, as peças foram tratadas termicamente com tratamento T6 (depois de trabalhadas, as peças são solubilizadas e envelhecidas artificialmente, conforme ilustra a Figura 10) em forno tipo poço, com circulador de atmosfera, para evitar gradientes de temperatura. As peças foram submetidas a um processo de solubilização em temperatura de 505°C, com exposição de 15 minutos, seguido de resfriamento em água. Na seqüência, sofreram tratamento de envelhecimento artificial, sendo aquecidas a 170°C por um tempo de exposição de 6 horas, seguido de resfriamento ao ar livre.

Para a análise de dureza das peças, selecionaram-se seis amostras conforme Tabela 1.

Estas amostras foram submetidas a ensaio de dureza em escala Vickers<sup>4</sup> (HV), com carga de 50 g e tempo de 15 segundos. As amos-

tras após tratamento térmico e a amostra da ferradura importada foram ainda submetidas à metalografia, utilizando-se dos procedimentos padrões de preparação de amostra, com lixamento na seqüência de lixas de granulometrias 100, 220, 400, 600, 1200 e polidas com alumina em granulometria de 0,3µm. O ataque utilizado foi o reagente Keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO<sub>3</sub>, 190ml H<sub>2</sub>O).

Determinou-se, por fim, a composição química das ligas utilizadas no trabalho, bem como a da ferradura importada através de espectrometria óptica.

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversos aspectos do ensaio foram observados e avaliados a fim de se obter as conclusões sobre o processo de forjamento. A seguir são descritos os principais pontos considerados.

#### Força de forjamento

Na conformação registrou-se a força máxima aplicada em cada peça para as duas pré-formas avaliadas. No processo da peça originada da pré-forma em "U", a força média necessária para a conformação foi de 1.240 kN, enquanto que para a geratriz em pré-forma de ferradura a força média foi de 890 kN.

Percebe-se aqui uma diferença de 350 kN na força necessária para o preenchimento da cavidade da peça, ou seja, a geratriz com pré-forma de ferradura necessitou de 28,2% a menos de força para ser forjada. Esse excedente de força necessário para a conformação da peça com pré-forma em "U" se deve a maior espessura da rebarba formada, a qual se concentra em regiões localizadas nas laterais e extremidades da ferradura.

#### Preenchimento da cavidade

Após o forjamento, avaliou-se o preenchimento da cavidade da matriz. As peças forjadas a partir da geratriz em forma de "U" não apresentaram bons resultados, tendo excesso de rebarba na região interna da ferradura e falta de preenchimento nas regiões laterais externas. As peças forjadas a partir da pré-forma de ferradura tiveram total preenchimento da cavidade da matriz, apresentando ainda uniformidade de distribuição de rebarba. A Figura 11 apresenta o comparativo entre as peças forjadas com cada tipo de pré-forma.

Para que se obtenha um completo preenchimento da peça com a pré-forma simples em "U", faz-se

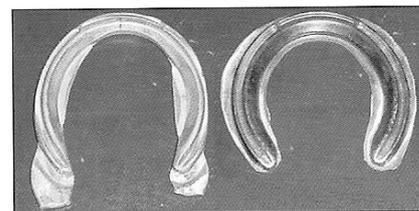


Figura 11 - Peças com rebarba geradas respectivamente com a pré-forma em "U" e pré-forma em ferradura

<sup>4</sup> Dureza Vickers: método de classificação da dureza dos materiais baseado em ensaio laboratorial, que consiste em uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida, com uma força arbitrária "F", contra a superfície do material. Calcula-se a área "A" da superfície impressa pela medição das suas diagonais.

Amostra	Descrição
1	Matéria-prima não deformada
2	Peça forjada - Pré-forma em U
3	Peça forjada - Pré-forma em ferradura
4	Peça tratada - Pré-forma em U
5	Peça tratada - Pré-forma em ferradura
6	Ferradura importada marca Victory®

Tabela 1 - Denominação das amostras

necessário aumentar o diâmetro da geratriz a fim de fornecer material suficiente ao escoamento e preenchimento de toda a cavidade da matriz, gerando com isso desperdício de material e aumento de rebarba nas demais regiões da peça. Este aumento de material necessariamente aumentará também a força de conformação.

**Composição química**

Como resultado da análise de composição química, a liga utilizada neste trabalho classifica-se como liga de alumínio AA 6351, a base de Al-Si-Mg<sup>5</sup>, conforme expresso na Tabela 2:

Fe	Si	Mn	Mg	Al
0,23	0,93	0,49	0,64	97,69

Tabela 2 - Composição química da liga utilizada (Aa6351)

A liga da ferradura importada apresentou a composição química (Tabela 3). Este resultado indica que a liga da ferradura está caracterizada como sendo uma liga de alumínio AA 6063, a base de Al-Si-Mg, assim como a liga utilizada na presente pesquisa.

Fe	Si	Mn	Mg	Al
0,22	0,54	0,04	0,52	98,67

Tabela 3 - Composição química da ferradura importada (Aa6063)

**Dureza**

Após medição da dureza Vickers, encontraram-se os resultados indicados na Tabela 4 através de média aritmética simples de 10 pontos distribuídos ao longo do perfil das amostras.

Analisando-se a Tabela 4, pode-

Amostra	1	2	3	4	5	6
Dureza (HV)	51	71	69	113	115	101
Desvio padrão	2,8	3,6	2,9	3,1	3,1	2,7

Tabela 4 - Durezas obtidas

se notar o aumento de dureza conferido à liga durante o processo de conformação. A matéria-prima obteve dureza de 51HV no estado recozido. Depois de conformadas, as peças originadas das geratrizes em forma de "U" e de ferradura obtiveram, respectivamente, 71HV e 69HV, ou seja, um incremento de dureza de 39,2% e 35,3%. Esse significativo aumento de dureza do material pode ser explicado pela deformação imposta, com conseqüente recristalização dos grãos, gerando ainda novos e menores precipitados. Observa-se que ambas as peças tiveram durezas semelhantes, independentes da pré-forma utilizada.

Após serem tratadas termicamente, as peças adquiriram dureza final de 113HV e 115HV, representando um acréscimo de dureza de 121,6% e 125,5% em relação à matéria-prima. A ferradura importada foi caracterizada com uma dureza de 101HV. Fazendo-se um comparativo entre as ferraduras tratadas produzidas neste estudo e a ferradura importada, podemos observar que a peça produzida obteve uma dureza aproximadamente 14% maior que a similar importada.

A dureza da liga AA6351 após tratamento térmico T6 é de 107HV [10]. Como o resultado das peças foi de 113HV e 115HV após o tratamento térmico, pode-se afirmar que o mesmo teve resultado efetivo no aumento da dureza das peças e, portanto, comportou-se como o esperado. Da mesma maneira, para a liga da ferradura importada, a referência citada aponta dureza após tratamento térmico T8 (as peças são solubilizadas, trabalhadas e então envelhecidas artificialmente) de 92HV. Também aqui o resultado

pode ser considerado bom quanto à efetividade do tratamento térmico.

**Análise metalográfica**

Foram caracterizadas as amostras 1, 4, 5 e 6, denominadas de acordo com a Tabela 1. A estrutura obtida pela análise da amostra 1 (matéria-prima) indicou a presença de precipitados poligonais, com distribuição relativamente homogênea na matriz do alumínio, bem como algumas porosidades na liga, conforme revela a macrografia não atacada na Figura 12.

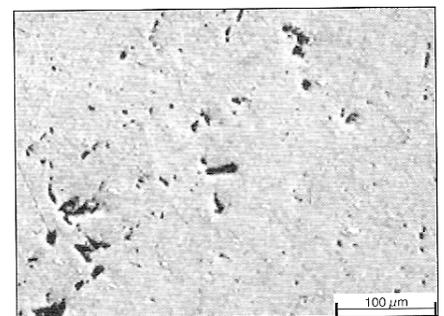


Figura 12 - Amostra 1, não atacada

As análises das amostras 4 e 5 tiveram resultados idênticos, não sendo notada qualquer diferença micro estrutural entre as duas. Percebe-se a presença de precipitados predominantemente esféricos em ambas as amostras (Figuras 13 e 14).

A amostra 6 (peça comercial importada) revelou a existência tam-

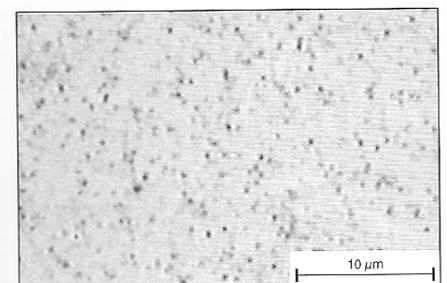


Figura 13 - Amostra 4, ataque Keller

<sup>5</sup> Al-Si-Mg: alumínio, silício e magnésio.

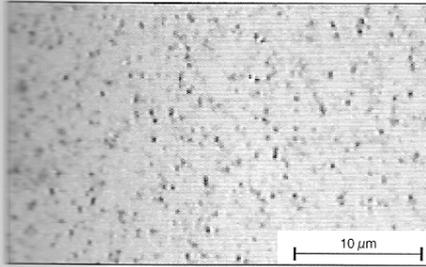


Figura 14 - Amostra 5, ataque Keller

bém de poros no material e de precipitados predominantemente esféricos e alguns precipitados poligonais de tamanho grosseiro, dispersos homoganeamente na matriz do alumínio, conforme mostra a Figura 15.

Observou-se neste estudo que a geratriz com perfil similar ao da ferradura se mostrou mais adequada ao processo. Obteve-se, com este tipo de pré-forma, um melhor preenchimento da cavidade e uma força de conformação 28,2% menor.

As duas geratrizes não apresen-

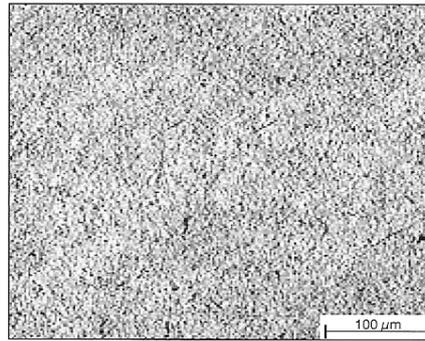


Figura 15 - Amostra 6, ataque Keller

taram diferenças entre a morfologia de seus precipitados, sendo ambos esféricos e homoganeamente distribuídos na matriz do alumínio. Na microestrutura da ferradura importada, encontraram-se precipitados predominantemente esféricos, mas também alguns precipitados poligonais de tamanho maior que os primeiros.

Notou-se também um aumento de dureza da liga no processo de conformação da peça, sendo que,

depois de obtidas as peças finais forjadas e tratadas termicamente, conseguiu-se um aumento de dureza de 121,6% e 125,5%, respectivamente às pré-forma de "U" e de ferradura, em relação à matéria-prima. Comparando-se as duas geratrizes, não houve diferença significativa de dureza entre elas.

Em comparação com a ferradura importada, as peças geradas pela pré-forma em "U" e de ferradura apresentaram dureza 11,9% e 13,8%, respectivamente, superiores a similar de mercado.

### Agradecimentos

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

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zitz, U.; *Die forged engine and automotive components from high performance aluminum*, À publicar em: SENAFOR, XXVI, Porto Alegre, 2006. Anais do congresso.
- [2] Loureiro Filho, L. C.; Cardoso, J. O.; *Por um Brasil mais competitivo*, Revista Alumínio, número V, ano II, 4º trimestre de 2005, pág. 14-16.
- [3] Randon, V.; Neto, V. P.; *Ligas avançadas utilizadas no desenvolvimento de peças para a indústria aeronáutica empregam processos sofisticados*, Revista Metalurgia e Materiais, Caderno Técnico, Out/2005, pág. 591-593.
- [4] Shan, D.; Liu, F.; Xu, W.; Lu, Y.; *Experimental study on process of precision forging of aluminum-alloy rotor*, Journal of Materials Processing Technology, 170, pág. 412-415, 2005.
- [5] Oliveira R. A.; Koeller L. A.; Schaeffer, L.; *Evaluation of two commercially-available lubricants by means of ring test to AA 6061 F aluminum alloys*, Revista Materials Research, volume 6, número 4, São Carlos, SP, Oct./Dec. 2003.
- [6] Schaeffer, L.; *Forjamento – Introdução ao processo*, pág. 131, Porto Alegre, RS, 2001.
- [7] Crumbach, M.; Goerdeler, M.; Gottstein, G.; *Modelling of recrystallisation textures in aluminium alloys: II Model performance and experimental validation*, Acta Materialia Inc 54, pág. 32913306, 2006. www.sciencedirect.com.
- [8] Adolf, W. W.; *Schmiedeteile aus Aluminium Legierungem*, Schmiede Journal, Março/1999, pág. 16-20.
- [9] Hesse, R.; Schaeffer, L.; *Forjamento de alumínio: considerações preliminares*. IV Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre, 2000. Anais do congresso, pág. 63-67.
- [10] ASM METALS HANDBOOK Vol 2; *Properties and selection: Nonferrous Alloys and Specials-Purpose Materials*, pág. 195, 10ª Edição, 1990.
- [11] Smith, W.; *Structure and properties of engineering alloys*, New York, 1993.

**Diego Rodolfo Simões de Lima** - Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e mestrando na área de Processos de Fabricação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, atuando no Grupo de Estudos em Forjamento, Simulação e Ensaios.

**Lírio Schaeffer** - Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen/Alemanha (RWTH). Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do CNPq, professor das disciplinas de processos de fabricação por conformação mecânica e vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia da UFRGS. Autor de vários livros sobre conformação mecânica.