

## ANÁLISE DA QUALIDADE DA HOMOGENEIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351 T6

Thayná Orcines da Silva Couto, thaynaosc@gmail.com<sup>1</sup>  
Elhadji Cheikh Talibouya Ba, cheikh.ba460@hotmail.com<sup>1</sup>  
Paulo Sérgio Martins, paulosergio.martins@fcagroup.com<sup>2</sup>  
Cíntia Dayhane de Abreu Martins, cinthiadayanne1@hotmail.com<sup>1</sup>  
Miriane Cristina Silva Souza, mirianesouza@live.com<sup>1</sup>  
Ana Luiza Ramos Ferreira, analuiza\_ramosferreira@hotmail.com<sup>1</sup>  
Carlos Alberto de Sousa Neves, casnevesengmecanico@gmail.com<sup>2</sup>  
Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, pamerico@pucminas.br<sup>2</sup>  
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com<sup>3</sup>  
José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário Una, Engenharia Mecânica, Rua dos Aimorés, 451, Lourdes, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

<sup>2</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

<sup>3</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253, Nova Suíça, CEP: 30421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

**Resumo.** O mundo atual demanda cada vez mais por materiais específicos para os mais diversos tipos de aplicação. Uma das principais propriedades de caracterização de um material é a dureza, pois está diretamente relacionada com a resistência às deformações elástica e plástica. O alumínio apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não ferroso mais consumido no mundo. As ligas da série 6XXX apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem, usinagem e resistência à corrosão. Este trabalho vem com o propósito de investigar a influência da dureza da liga de alumínio 6351 T6, na formação do cavaco durante o torneamento à seco. A metodologia do trabalho de caráter experimental realizou a microdureza Vickers do material após serem usinados 5 corpos de prova variando o parâmetro de profundidade de corte ( $a_p$ ) em 0,2mm. Os resultados foram analisados estatisticamente. Pode-se concluir que os resultados obtidos mostraram uma variação de dureza superficial conforme a variação da  $a_p$  apresentada. Confirmou-se a hipótese da não homogeneização da microestrutura da liga de alumínio estudada, a qual é submetida ao tratamento de envelhecimento e solubilização.

**Palavras chave:** Usinagem. Alumínio 6351. Tratamento Térmico T6. Dureza. Microdureza.

### 1. INTRODUÇÃO

O alumínio, devido às suas excelentes qualidades, tem tomado lugar importante em aplicações de engenharia, tornando-se o material não ferroso mais produzido na indústria metalmeccânica. O alumínio e suas ligas podem ser fundidos e conformados por praticamente todos os processos conhecidos. As formas fabricadas de alumínio e suas ligas podem ser divididas em dois grupos: produtos padronizados e produtos de engenharia. Os produtos padronizados incluem folhas, chapas, vergalhões, barras, fios, tubos e formas estruturais. Os produtos de engenharia são aqueles projetados para aplicações específicas e incluem perfis extrudados, forjados, fundidos, estampados, partes de metalurgia do pó, partes usinadas e compósitos de matriz de metal (Metals Handbook, 1992).

Souza (2013) diz que, as ligas de alumínio são classificadas como tratáveis e não tratáveis termicamente, conforme a maneira que o endurecimento do material é conseguido, sendo que nas ligas tratáveis termicamente, o trabalho mecânico à frio (laminação a frio ou trefilação) aumenta a quantidade de discordâncias no metal, aumentando sua resistência mecânica. O grupo de ligas não tratáveis compreende as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. O grupo das ligas tratáveis termicamente corresponde às séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e algumas ligas do grupo 8.

A intenção principal no projeto destas ligas de alumínio é o aumento da resistência, dureza e resistência ao desgaste, fluência, alívio de tensão ou fadiga. A adição de elementos químicos tais como o cobre, zinco, manganês, silício, magnésio e ferro confere ao alumínio novas propriedades mecânicas. As ligas da série 6XXX têm como principais elementos de liga o magnésio (Mg) e o silício (Si). O teor de Si normalmente aumenta a abrasividade do material, enquanto o Mg aumenta a resistência mecânica. Podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e decoração, quadros

de bicicletas, ou ainda estruturas soldadas. Ligas dessa série, como a 6351 (0.70% a 1.30% de Si e 0.40% a 0.80% de Mg), tem boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência a corrosão, com média resistência mecânica. As ligas desta família podem ter suas propriedades aprimoradas de forma mais expressiva através do tratamento T6, solubilização seguida de envelhecimento artificial (Metals Handbook, 1992; Abal apud Dobler, 2014; Gorla, 2015; Hatch, 1984; Coutinho, 1980).

O tratamento térmico de solubilização consiste em aquecer o material em determinada temperatura, e tem como finalidade dissolver todos os elementos de liga na matriz de alumínio, a fim de se obter uma solução sólida homogênea. A liga é resfriada rapidamente com o objetivo de obter-se uma solução sólida supersaturada. Após o resfriamento brusco do material partindo da temperatura de solubilização até a temperatura ambiente, realizam-se os tratamentos de envelhecimento, responsáveis pela formação dos precipitados endurecedores, isto é, regiões de segregação do soluto ou núcleos (Milkereit et al., 2009; Dieter, 1988).

O princípio geral da indentação 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 (Chicot et al., 2006).

A usinagem é um dos processos de fabricação que tem como característica principal a produção de uma peça acabada por meio da retirada de material (cavaco). Este processo envolve elevados níveis de deformação e geração de calor na interface cavaco-ferramenta (Gonçalves, 2012). Ferraresi (1977) diz que o cavaco é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem e pode variar em tipo, forma e extensão para cada operação de usinagem ou mesmo em uma única operação como o torneamento.

O grau de recalque do cavaco ( $R_c$ ) é a razão entre a espessura do cavaco ( $h'$ ) e a espessura de corte ( $h$ ). No corte ortogonal ele é um indicador de deformação sofrida pelo cavaco. Um grau de recalque elevado, que corresponde a um pequeno ângulo de cisalhamento, significa grande quantidade de deformação e baixa velocidade de saída do cavaco (Micheletti, 1980).

Este trabalho vem com o objetivo de investigar homogeneização da microestrutura ao longo da seção transversal da liga de alumínio 6351 T6 por meio de ensaios de microdureza Vickers e de torneamento à seco, variando-se a profundidade de corte. Observou-se a formação do cavaco e o grau de recalque, através de um software os resultados obtidos foram analisados estatisticamente.

## 2. METODOLOGIA

Foram preparados 5 corpos de prova com dimensões iniciais de 200mm de comprimento e 25,4mm de diâmetro, que após desbastado ficaram com 25mm de diâmetro. Para um melhor aproveitamento, optou-se em dividir os corpos de prova em dois lados, A e B, assim sendo capaz de utilizar 120mm de comprimento para usinagem. Assim, foram obtidas 10 amostras a serem analisadas. A Figura 1 mostra a modelagem 3D do corpo de prova utilizado.

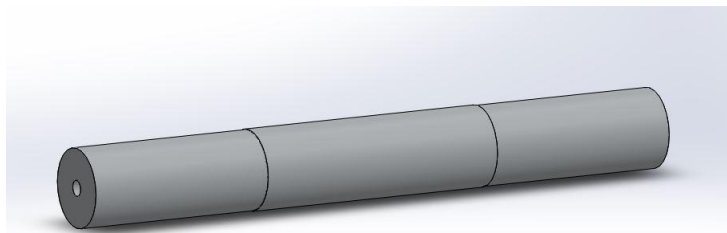


Figura 1. Modelagem do corpo de prova para o estudo de usinagem (Própria Autora, 2018)

Para investigar a influência da profundidade de corte e a homogeneização do material, um corpo de prova padrão foi preparado para análise da dureza ao longo da seção transversal. Utilizou-se um torno mecânico profissional de bancada, modelo Mr-334 Manrod, para a realização do torneamento à seco com o inserto WCGT040204 - PM2 WXN10 da marca WALTER, cujo o ângulo de posição principal é  $7^\circ$ , parâmetro este necessário para o cálculo da espessura de corte ( $h$ ). Utilizou-se também o porta inserto SWLCR1212F04.

Estabeleceu-se 10 valores de  $a_p$ , um para cada comprimento de usinagem, com incrementos sucessivos de 0,2mm, foram utilizados o avanço de 0,07mm/rot, a velocidade de corte de 160m/min e a rotação de 2000rpm.

Após cada desbaste foi coletada uma amostra do cavaco para o cálculo do grau de recalque. A espessura média do cavaco foi obtida através de quatro réplicas mensuradas por meio do paquímetro digital da marca Pantec, modelo/série 1109A4083, com a faixa de medição entre 0 e 150mm, resolução de 0,005mm e exatidão de  $\pm 0,02$ mm.

Em seguida realizou-se o ensaio de dureza pelo método Microdureza Vickers. Para realização deste método foi preciso particionar os corpos de prova em forma de pastilhas de  $\pm 10$ mm de espessura com o auxílio de uma serra de fita da marca Franho, cortou-se lentamente e refrigerou-se com água e fluido sintético em abundância. Após o

seccionamento de todos os corpos de prova, foi necessário embutir as amostras a quente com baquelite na Prensa de embutimento PRE-40, da marca Arotec, para que elas ficassem totalmente uniformes e niveladas com o intuito de mitigar quaisquer interferências na realização no teste. Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica preparada, foi essencial que cada etapa da preparação fosse executada cautelosamente. Com as amostras já estruturadas, foi necessário o lixamento manual com folhas de lixas de granulometria de nº 180, 220, 320, 600 e 1000 respectivamente, alternando a direção de lixamento ( $90^\circ$ ) em cada lixa subsequente, até desaparecerem os traços da lixa anterior, deixando as amostras mais polidas. As lixas tinham que estar úmidas para melhor retirada do pó proveniente do baquelite e entre uma lixa e outra, demandava-se a lavagem das amostras com água e sabão para a extração de toda partícula que posteriormente pudesse arranhar a superfície na utilização da próxima lixa. Depois de todas amostras lixadas e polidas, lavou-se as amostras com álcool, por ser um líquido de baixo ponto de ebulição que posteriormente foi secado rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por um secador para prevenir marcas de água na superfície.

No ensaio de microdureza, utilizou-se o Micro Hardness Tester HMV-2T, da marca Shimadzu com 400X de zoom, onde as imagens eram observadas com o auxílio do software HMV-AD instalado em um computador acoplado ao equipamento, tais resultados seriam confrontados com os valores de dureza do corpo padrão.

## 2.1. Aplicação da ferramenta *Statística*

Os dados obtidos foram analisados no software StatSoft, Inc. (2011) STATISTICA versão 10 para validar os resultados obtidos e verificar as influências da profundidade de corte e da dureza do material na formação do cavaco obedecendo o seguinte fluxograma (Fig. 2). Adotou-se o valor padrão de 95% de confiabilidade, no qual o fator p (índice de probabilidade de aceitação/rejeição de hipótese) é referenciado ao valor de 0,05.

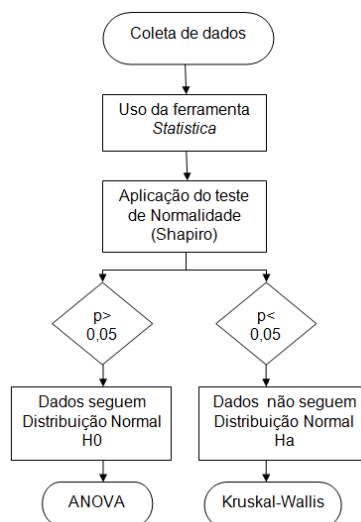


Figura 2. Fluxograma de análise estatística dos dados (Própria Autora, 2018)

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Grau de recalque

Conforme o teste estatístico aplicado (Tab. 1), o p-valor abaixo de 0,05 mostrou que o grau de recalque foi influenciado significativamente pela profundidade de corte. Na Figura 3 observa-se que o grau de recalque é mais propício ao crescimento até o  $a_p = 1,0$  mm, onde obteve uma leve queda em  $a_p = 0,6$ mm devido à deformação do cavaco ao enrolar-se no corpo de prova. O mesmo foi observado nos corpos de prova com 1,4 e 2,0 mm de profundidade de corte. De modo geral, observa-se a tendência do grau de recalque aumentar com o acréscimo da profundidade de usinagem. Segundo Machado et al. (2009) o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento são bons indicadores da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Quanto maior a deformação, maior o grau de recalque.

Tabela 1. Teste de hipótese Kruskal-Wallis ANOVA

| Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks; Grau de Recalque             |                |                               |                           |       |               |                   |
|-------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|-------|---------------|-------------------|
| Independent (grouping) variable: Profundidade de Corte (mm) |                |                               |                           |       |               |                   |
| Kruskal-Wallis test: H (9, N= 40) =36,2396                  |                |                               |                           |       |               |                   |
| Profundidade de Corte (mm)                                  | Nº de amostras | Somatória de posições (ranks) | Média de posições (ranks) | Média | Desvio Padrão | p-valor calculado |
| 0,2                                                         | 4              | 10,00                         | 2,50                      | 3,79  | 0,30          | 0,0000            |
| 0,4                                                         |                | 26,50                         | 6,63                      | 5,91  | 0,41          |                   |
| 0,6                                                         |                | 43,00                         | 10,75                     | 6,88  | 0,61          |                   |
| 0,8                                                         |                | 108,00                        | 27,00                     | 10,32 | 0,28          |                   |
| 1,0                                                         |                | 137,00                        | 34,25                     | 11,91 | 0,33          |                   |
| 1,2                                                         |                | 88,50                         | 22,13                     | 9,75  | 0,55          |                   |
| 1,4                                                         |                | 57,50                         | 14,38                     | 7,93  | 0,63          |                   |
| 1,6                                                         |                | 120,00                        | 30,00                     | 11,25 | 1,69          |                   |
| 1,8                                                         |                | 147,00                        | 36,75                     | 12,38 | 0,52          |                   |
| 2,0                                                         |                | 82,50                         | 20,63                     | 9,55  | 0,80          |                   |

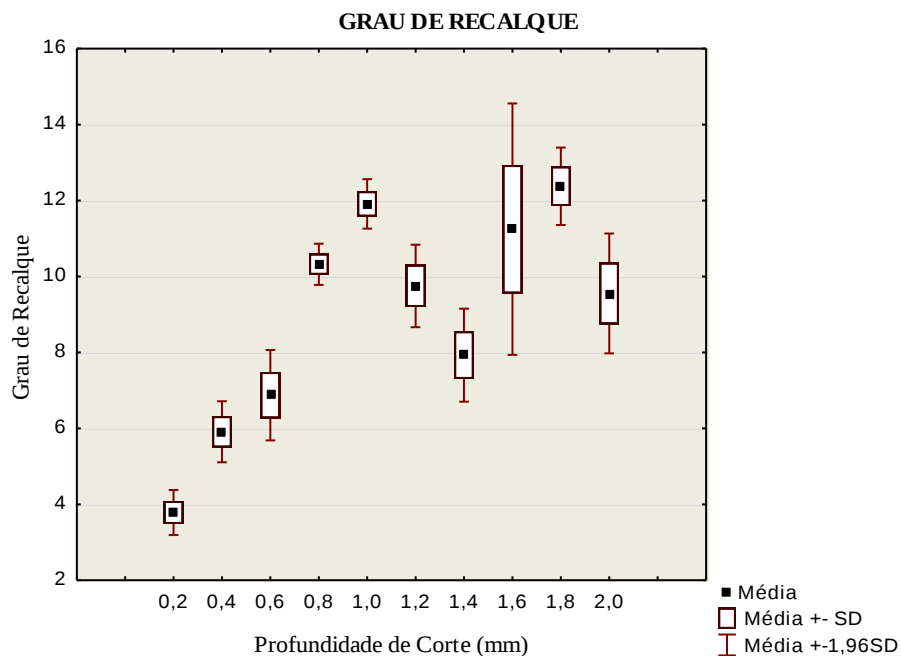


Figura 3. Grau de Recalque (Própria Autora, 2018)

### 3.2. Análise da microdureza Vickers

Como todos corpos de prova aplicados ao teste de Normalidade (Shapiro) obtiveram o p maior que 0,05, os dados seguiram a distribuição normal e aceitou-se H0 (Fig. 2). Aplicando o teste de ANOVA One Way, gerou-se o gráfico a seguir (Fig. 4), onde pode-se observar o  $p = 0,00044$ . Neste caso há evidência para se rejeitar a hipótese nula (H0), ou seja, há diferença significativa na dureza superficial das amostras.

Pode-se observar através do gráfico um decaimento da dureza conforme o aumento da profundidade de corte, a dureza máxima foi obtida na profundidade de corte de 0,2mm e a menor dureza no  $a_p = 1,6$  mm.

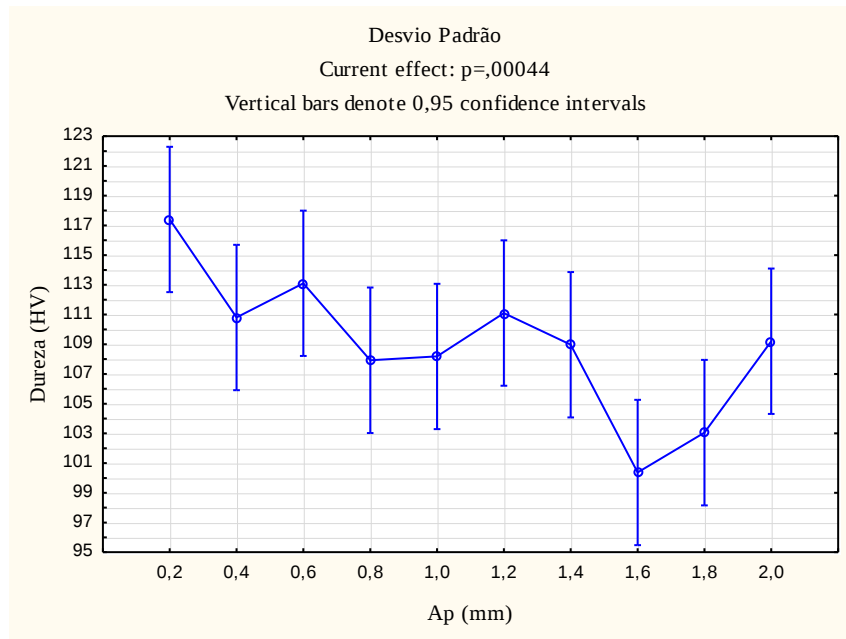


Figura 4. Relação de dureza entre as profundidades de corte (Própria autora, 2018)

A microdureza medida ao longo do raio do corpo de prova não usinado, representado na Fig. 6, mostra uma grande variação. Vale ressaltar que ao realizar as impressões, não foi possível escolher as áreas para indentação com menos discordâncias do material, como foi realizado nos testes anteriores, já que não era possível rotacionar ou mover as amostras para que não se perdessem o posicionamento para a distância de 0,5mm entre as indentações.

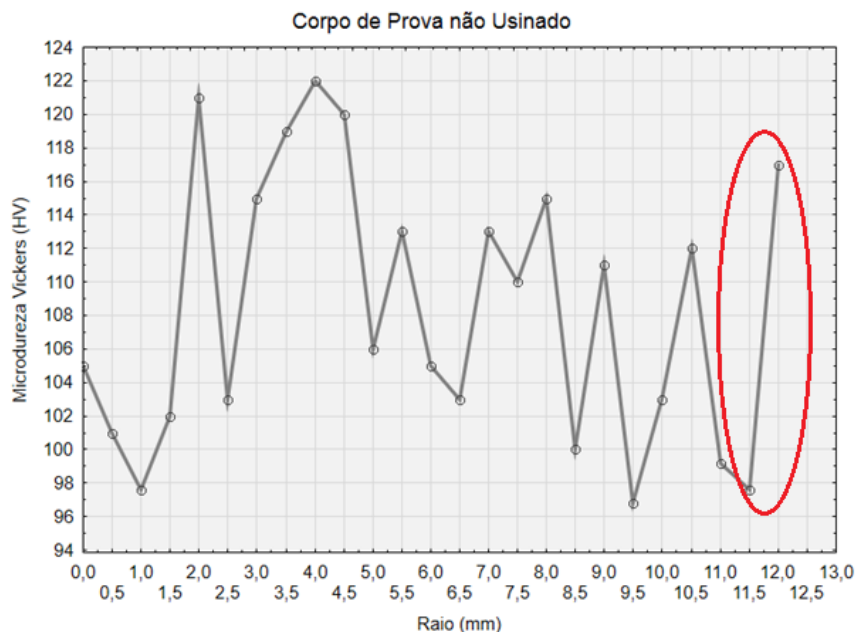


Figura 6. Dureza medida ao longo do raio (Própria autora, 2018)

Apesar de não ser um dado estatisticamente confiável, por ter apenas uma medição realizada para cada ponto no raio, o intervalo circulado em vermelho se destaca pelo fato de ser a área correspondente às profundidades de corte dos corpos de prova usinados que foram analisados anteriormente, e também apresenta uma diminuição da dureza conforme o aumento da profundidade de corte (Fig. 4).

#### 4. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica em banco de dados e os resultados obtidos permitiram concluir que houve uma variação de dureza conforme a  $a_p$  apresentada. Portanto, quanto maior a profundidade de corte aplicada nos corpos de prova, menor

a dureza superficial, que por sua vez, confirma a hipótese da não homogeneização da microestrutura do alumínio 6351, submetido ao tratamento de envelhecimento e solubilização, utilizado para a usinagem.

Pode-se observar também que as médias das durezas obtidas das amostras usinadas são maiores que a dureza teórica do material já tratado, de 107HV. Pode-se dizer que a profundidade de usinagem não trouxe influência na dureza superficial, ou seja, esperava-se que o aumento da profundidade de corte levasse a um aumento de encruamento superficial. Sendo assim, supõe-se que a queda de dureza à medida que se aproxima do centro do material (em sua seção transversal) esteja associada à eficácia do tratamento térmico. Esse resultado também pode ser associado aos valores de dureza observados na amostra não usinada, onde observou-se uma queda de dureza na região, que se corresponde à região que foi aplicada profundidade de corte avaliada.

Sendo assim pode-se supor que a homogeneização do tratamento térmico T6 não é totalmente eficaz. Embora tenha atingido o objetivo de aumentar a dureza do alumínio como foi constatado nos testes, essa não homogeneização pode ter sido causada pela concentração dos elementos de liga na superfície do material, causando um endurecimento superficial.

## 5. REFERÊNCIAS

- Chicot, D., Mercier, D., Roudet, F., Silva, K., Staia, M.H., Lesaje J., 2006, Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurement on various soft materials and hard ceramics. Journal of the Europe Ceramic Society.
- Coutinho, T.A., 1980, Metalografia de não ferrosos: análise prática. São Paulo: Edgar Blucher, 1980.
- Dieter, G. E. Mechanical metallurgy. 3 Ed. Boston: McGraw-Hill, 1988.
- Dobler, J. K., 2014, Estudo comparativo de estratégias de usinagem na fabricação de um modelo de alumínio. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi.
- Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora EdgardBlucher Ltda, São Paulo, 751 p., 1977.
- Gonçalves, R. A. Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2012.
- Gorla, F. F. L. Torneamento da liga de alumínio da classe 6005 utilizando ferramenta cerâmica, Trabalho de Graduação, Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2015.
- Hatch, J. E., 1984, Aluminum: properties and physical metallurgy. Ohio: American Society for Metals.
- Machado, A. R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais - São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.
- Metals Handbook, 1992, "MACHINING". Vol. 16X21, 10ª Edition, 929p.
- Micheletti, G.F, Mecanizado por Arranque de Virtuta. 1th ed. Barcelona: Blume, 426 p, 1980.
- Milkereit, B.; Kessler, O.; Schick, C. Recording of continuous cooling precipitation diagrams of aluminium alloys. Thermochimica Acta, v. 492, p. 73–78, 2009.
- Sousa, M.N., 2013, Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade - foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza das cavacos. Tese de Doutorado- Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Minas Gerais.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## ANALYSIS OF THE QUALITY OF MICROSTRUCTURE HOMOGENIZATION OF ALUMINUM ALLOYS 6351 T6

Thayná Orcines da Silva Couto, thaynaosc@gmail.com <sup>1</sup>  
Elhadji Cheikh Talibouya Ba, cheikh.ba460@hotmail.com <sup>1</sup>  
Paulo Sérgio Martins, paulosergio.martins@fcagroup.com <sup>2</sup>  
Cíntia Dayhane de Abreu Martins, cinthiadayanne1@hotmail.com <sup>1</sup>  
Miriane Cristina Silva Souza, mirianesouza@live.com <sup>1</sup>  
Ana Luiza Ramos Ferreira, analuiza\_ramosferreira@hotmail.com <sup>1</sup>  
Carlos Alberto de Sousa Neves, casnevesengmecanico@gmail.com <sup>2</sup>  
Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior, pamerico@pucminas.br <sup>2</sup>  
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com <sup>3</sup>  
José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário Una, Engenharia Mecânica, Rua dos Aimorés, 451, Lourdes, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

<sup>2</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

<sup>3</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253, Nova Suíça, CEP: 30421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil.

**Abstract.** *The current world demand for more and more specific materials for the most diverse types of application. One of the main properties for characterization of a material is the hardness, since it is directly related with the resistance to deformation, elastic and plastic. The aluminum features a wide variety of use, which makes it the most non-ferrous metal consumed in the world. The alloys of the series 6XXX exhibit good ductility, good welding characteristics and machining and good corrosion resistance. This work comes with the purpose of investigating the influence of hardness of aluminum alloy 6351 T6, the formation of the chip during the turning to dry. The methodology of work of an experimental nature, was held to microhardness Vickers of the material after being machined 5 bodies of evidence varying the parameter depth of cut (ap) 0.2 mm. The results were statistically analyzed. It can be concluded that the results obtained showed a variation of surface hardness as the variation of the ap displayed. This confirmed the hypothesis of non-homogeneity of the microstructure of the aluminum alloy studied, which is subjected to the aging treatment, and solubilization.*

**Keywords:** *Machining. Aluminum 6351. Heat treatment T6. Hardness. Microhardness.*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.