

## INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NO ROSQUEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351

### Ricardo Augusto Gonçalves

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK, Rodovia MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP: 39100-000  
ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br

### Márcio Bacci da Silva

### Éder Silva Costa

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila nº 2121, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, CEP: 38408-100  
mbacci@mecanica.ufu.br  
eder@mecanica.ufu.br

**Resumo.** A adição de cobre a ligas Al-Si-Mg fornece ligas de alumínio com uma ampla gama de propriedades e aplicações. Assim, este estudo investiga o papel da adição de cobre em uma usinabilidade da liga de alumínio Al-Si-Mg (6351). A usinabilidade foi avaliada durante o processo de rosqueamento a partir do torque, análise de roscas e modificações sub-superficiais. Os ensaios de rosqueamento foram realizados usando um macho de aço rápido com canais helicoidais em uma faixa de cinco níveis de velocidade de corte. As amostras foram produzidas com cinco níveis de cobre (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93%) e possuem composição química dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro da faixa recomendada pela The Aluminium Association para esta liga. As maiores quantidades de cobre resultaram em aumento significativo na microdureza, dureza e resistência à tração final da liga de alumínio, enquanto o alongamento após a fratura diminuiu. Os resultados mostraram a influência da adição de cobre na usinabilidade desta liga de alumínio. Menores valores de torque foram obtidos aumentando o teor de cobre na liga de Al-Si-Mg estudada. Além disso, foi observado o endurecimento próximo à superfície usinada promovido pelo processo de rosqueamento.

**Palavras chave:** Cobre, Rosqueamento, Liga de alumínio 6351, Usinabilidade

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o metal não ferroso com maior produção e aplicação na indústria mundial. Somente em 2018 foram produzidas mais de  $64 \times 10^3$  toneladas de alumínio primário em todo o mundo (World Aluminium, 2019). Por vezes tratado como o “metal da vida moderna”, o alumínio ganhou mercado devido à sua versatilidade e excelentes propriedades. O uso do alumínio aumentou em vários campos, como aeroespacial, automotivo, transmissão de energia, construção e embalagem. Isto se deve principalmente porque este material apresenta boa relação peso/resistência mecânica, boa condutividade elétrica e térmica, ótima aparência e, especialmente, sua infinita reciclabilidade.

Na maioria das aplicações de engenharia, o alumínio é usado em ligas com vários elementos de liga para fornecer propriedades específicas. As ligas Al-Si-Mg (grupo 6XXX), amplamente utilizadas em estruturas soldadas, equipamentos rodoviários, arquitetônicos e de decoração, têm como principais elementos de liga o silício e o magnésio. A proporção de Mg e Si nestas ligas visa a formação da fase  $Mg_2Si$ , tornando-as tratáveis termicamente. O teor de silício geralmente aumenta a dureza, enquanto o magnésio aumenta significativamente a resistência mecânica da liga de alumínio, sem diminuir a ductilidade (Asm International, 1990). Além de magnésio e silício, outros elementos, em quantidades menores, também são adicionados para modificar certas propriedades da liga, como cobre, ferro, manganês, cromo, zinco, titânio, entre outros. Grandes aumentos de resistência mecânica podem ser obtidos pela adição de cobre em ligas Al-Si-Mg, além de considerável refinamento da estrutura do precipitado (Tiryakioglu; Staley, 2003).

O rosqueamento é um processo de usinagem para produzir roscas internas. Um macho de corte é uma ferramenta de corte de rosca cilíndrica ou cônica que tem filetes de uma forma desejada na periferia. Combinando movimento rotativo com movimento axial, o macho corta ou forma a rosca interna (Asm International, 1990b). O macho de corte é atualmente a ferramenta de corte mais utilizada para a fabricação de roscas internas devido à sua alta produtividade e maior precisão, tanto para diâmetros pequenos como grandes (Pereira, et al., 2010).

Embora muitos dados estejam disponíveis sobre como a adição de cobre influencia as propriedades mecânicas das ligas Al-Si-Mg e a influência deste elemento químico na usinabilidade de outras ligas de alumínio, mais pesquisas e conhecimentos são necessários sobre como a adição de cobre e conseqüentemente mudanças causadas na microestrutura e propriedades mecânicas pode influenciar o comportamento de ligas de alumínio Al-Si-Mg durante a usinagem. Assim,

o principal objetivo deste trabalho é estudar a influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio Al-Si-Mg (6351). A usinabilidade desta liga foi avaliada através de medições do torque da ferramenta de corte, análise das roscas usinadas e modificações sub-superficiais durante os processos de rosqueamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de liga Al-Si-Mg (6351 - T6) foram produzidas com cinco níveis de adição de cobre (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93%) e possuem composição química dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro do recomendado pela Associação do Alumínio para esta liga (The Aluminum Association, 2015) como mostrado na Tabela 1. Estas ligas foram especialmente fabricadas para este trabalho pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), não são ligas comerciais. Os corpos de prova para os testes de usinagem foram preparados com as seguintes dimensões: 129 mm x 78 mm x 15 mm.

Tabela 1. Composição química das amostras da liga de alumínio 6351

Amostras	Liga	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	6351	98,06	0,80	0,19	0,07	0,44	0,40	0,003	0,006	0,026
2		97,92	0,77	0,17	0,23	0,48	0,41	0,003	0,006	0,030
3		97,02	0,88	0,21	0,94	0,50	0,41	0,003	0,006	0,026
4		96,54	0,88	0,21	1,43	0,49	0,41	0,003	0,005	0,030
5		96,06	0,87	0,21	1,93	0,49	0,40	0,003	0,005	0,027
(*) AA		-	0,7-1,3	0,5	0,10	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2

(\*) limites de composição química para a liga de alumínio 6351 registrados pela Associação do Alumínio (The Aluminum Association, 2015)

Os testes de usinagem foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC ROMI (10.000 rpm). A operação de furação foi realizada com uma broca helicoidal de aço rápido-HSS A100 (Dormer), sem revestimento, com ângulo de ponta de 118° e diâmetro de 5 mm. Para a operação de rosqueamento foi utilizado um macho de corte de aço rápido-HSS (OSG Sulamericana), de diâmetro M6 mm, passo de 1 mm, com 2 canais e 45° de ângulo de hélice. A profundidade de usinagem utilizada foi de 13 mm e a mesma velocidade do fuso (rpm) foi usada para a entrada e a saída do macho. A velocidade de corte foi variada em seis níveis (8, 10, 12, 14, 16, 18 m / min). Para cada condição de corte foi realizado um teste com duas repetições, os resultados apresentam os valores médios de torque máximo obtidos na fase de corte. Uma emulsão de óleo de base vegetal Vasco 1000 Blaser Swissslube foi usada como fluido de corte. A mesma foi preparada com concentração de 9% e aplicada na forma de jorro. O aparato utilizado para a medição do torque consiste de um dinamômetro rotativo Kistler, modelo 9123C1211, amplificador e condicionador de sinais Kistler, modelo 5019A, placa de aquisição de sinais NI PCI-6036E e software LabVIEW 7.6 National Instruments. Na Figura 1 são mostradas a ferramenta de corte, a amostra e o dinamômetro rotativo montados na máquina-ferramenta.

A dureza Vickers foi determinada usando um durômetro Wolpert Universal com 20 kg de carga usando um penetrador de diamante piramidal com uma base quadrada em um tempo de 30 s. A microdureza Vickers também foi medida usando um microdurômetro HMV Shimadzu com carga de 25g e tempo de indentação de 15s. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios com 300 kN Shimadzu. A análise microestrutural das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi realizada por um microscópio eletrônico de varredura (SEM) TM3000 Hitachi equipado com espectrômetro de dispersão de energia de raios-X (EDS) e um microscópio óptico Olympus BX51M. As amostras polidas foram condicionadas pelo reagente Kellers (2 ml de HF, 3 ml de HCl, 5 ml de HNO<sub>3</sub> e 190 ml de H<sub>2</sub>O).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Microestrutura

Com a adição de cobre em ligas de alumínio Al-Si-Mg, várias fases podem se apresentar. A presença dessas fases pode ser modificada pela composição química da liga e pelo tratamento térmico a que foi submetida. Apenas uma partícula da segunda fase foi encontrada nas amostras da liga de alumínio estudada. Esta partícula está preferencialmente localizada nos contornos de grão em forma de escrita chinesa cinza claro, destacada pelas setas amarelas na Figura 2 (b). A partir da análise EDS desta partícula, foram identificados os seguintes elementos: Cu, Fe, Mn e Si. Além disso, também foi observado um aumento do teor de cobre nessa partícula, à medida que a quantidade de

cobre adicionada à liga de alumínio foi aumentada, como mostra a Figura 2 (a). Este fato provavelmente aumenta a quantidade de constituinte  $CuAl_2$ , que age como uma fase de endurecimento desta liga após o tratamento térmico de precipitação. Além disso, também foi observado aumento na quantidade de cobre dissolvido na matriz Al, pois o teor de cobre adicionado à liga de alumínio 6351 foi maior. Isso provavelmente contribuiu para o aumento da dureza e da resistência mecânica através do endurecimento por solução sólida.

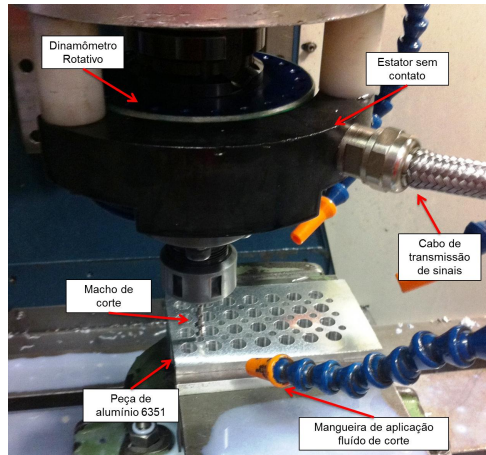


Figura 1. Equipamentos para a aquisição do sinal de torque, ferramenta de corte, mangueira para a aplicação de fluido de corte e corpo de prova montados na máquina-ferramenta

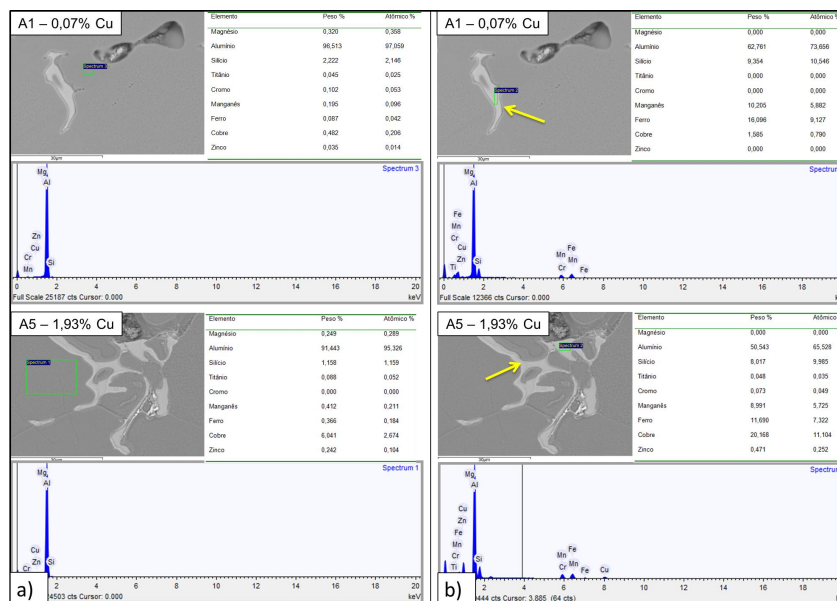


Figura 2. Análise EDS das amostras A1 - 0,07% Cu e A5 - 1,93% Cu na a) matriz de Al e b) partícula de segunda fase

### 3.2. Propriedades Mecânicas

Em geral, o aumento no teor de cobre adicionado à liga de alumínio 6351 aumentou a dureza média da liga, exceto para a amostra A5 (Tabela 2). O mesmo comportamento pode ser observado para a microdureza na matriz de Al e na partícula de segunda fase. Este aumento na dureza da liga de alumínio 6351 tratada termicamente com maior teor de cobre é provavelmente devido ao endurecimento por solução sólida promovido pelo cobre na matriz de alumínio, como observado por Wang et al. (2007) e confirmado pela análise EDS realizada neste trabalho. Quando em solução sólida, o cobre provoca deformação da rede cristalina, que é uma barreira ao movimento das discordâncias. Além disso, o aumento da dureza com maior quantidade de cobre adicionado à liga de alumínio 6351 é também devido à precipitação de fases como  $CuAl_2$  após o tratamento térmico (Zeren et al., 2011).

Ainda de acordo com a Tabela 2, pode-se observar que o limite de resistência à tração foi maior com mais cobre adicionado à liga de alumínio. Por outro lado, o alongamento diminuiu. Na condição tratada por solubilização, uma alta concentração uniforme de cobre relacionada à dissolução da fase  $\text{CuAl}_2$  pode promover a resistência à tração em detrimento do alongamento (Lu et al., 2015).

Tabela 2. Propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Amostras	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Vickers (HV)	Microdureza Vickers na matriz Al (HV)	Microdureza Vickers na segunda fase (HV)	Energia absorvida compensada (J)
A1	251,3	6,11	100,35	121,2	125,4	3,36
A2	262,5	5,91	107,18	113,2	138,6	3,11
A3	262,7	5,37	113,96	124,0	167,6	4,20
A4	258,4	4,95	116,78	133,4	174,4	4,40
A5	268,7	4,88	107,41	141,4	184,6	4,16

### 3.3. Torque

Na Figura 3 são mostrados os valores médios do torque medido na ferramenta de corte, com um intervalo de confiança de 95%, para as amostras de liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Em velocidades de corte mais baixas usadas (8 m/min e 10 m/min), as amostras A4 e A5 resultaram em média em valores de torque maiores. Estas amostras apresentam maior resistência mecânica, dureza e microdureza dos constituintes entre as amostras testadas. Não foi evidente para todas as amostras uma tendência crescente de aumento ou diminuição do torque com o aumento da velocidade de corte, como também foi observado por Pereira (2014). No entanto, para as amostras A4 e A5 verificou-se que à medida que a velocidade de corte aumenta, em média, o torque caiu. Este fenômeno pode ser explicado pelo efeito da diminuição da resistência durante a usinagem, devido à diminuição da resistência ao cisalhamento do material usinado. Esta diminuição na resistência ao cisalhamento é causada pelo aumento da geração de calor ao usinar em velocidades de corte mais altas (Machado et al., 2011).

Para as velocidades de corte de 12 m/min e 18 m/min, a amostra A1 se destacou, com em média o maior torque em relação às outras amostras investigadas. Esta amostra difere devido a sua maior capacidade de deformação e menor resistência mecânica e dureza entre as amostras testadas. O maior torque obtido na amostra A1, provavelmente é devido a sua maior capacidade de deformação. A maior ductilidade do material pode aumentar o comprimento de contato cavaco/ferramenta e, portanto, maiores as áreas de cisalhamento primária e secundária. Assim, o torque tende a ser maior.

Por outro lado, as amostras A2 e A3 resultaram em média em valores do torque mais baixos para todas as velocidades de corte testadas. Estas amostras têm menor resistência mecânica do que as amostras A4 e A5. Ao mesmo tempo, são menos dúcteis que a amostra A1.

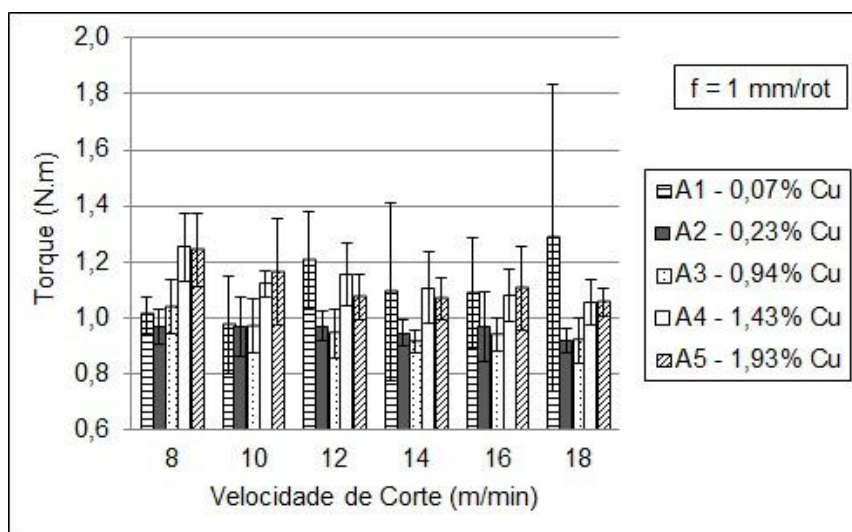


Figura 3. Torque em diferentes velocidades de corte no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

### 3.4. Análise dos Filetes da Rosca

Segundo Da Mota (2006), a adesão de cavacos nas roscas fabricadas e nas superfícies de saída e folga dos machos têm grande influência no desgaste e avaria das ferramentas. Na Figura 4 são apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de vistas frontais (início e fim das roscas) e laterais dos filetes das roscas produzidas pelo processo de rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

A primeira observação que pode ser feita é sobre a integridade dos filetes das roscas formadas durante o rosqueamento. Aparentemente os filetes formados se apresentaram íntegros e sem defeitos para praticamente todas as amostras da liga de alumínio ensaiadas. Apenas para a amostra A5 (1,93% Cu) foi observado um pequeno defeito, caracterizado por falta de material, destacado pela seta clara na Figura 4.

Além disso, foi verificada a presença de material aderido na forma de partículas e aglomerados nas roscas para todas as amostras rosqueadas, destacadas por setas escuras na Figura 4. De acordo com Da Mota (2006), estas partículas aderidas podem ter sua origem relacionada com a presença de cavacos tanto no estágio de corte como no retorno das ferramentas. Ainda segundo o autor, o desprendimento desse material aderido pode acarretar prejuízos ao macho de corte, provocando o seu desgaste em suas superfícies de saída e de folga pelo mecanismo de attrition.

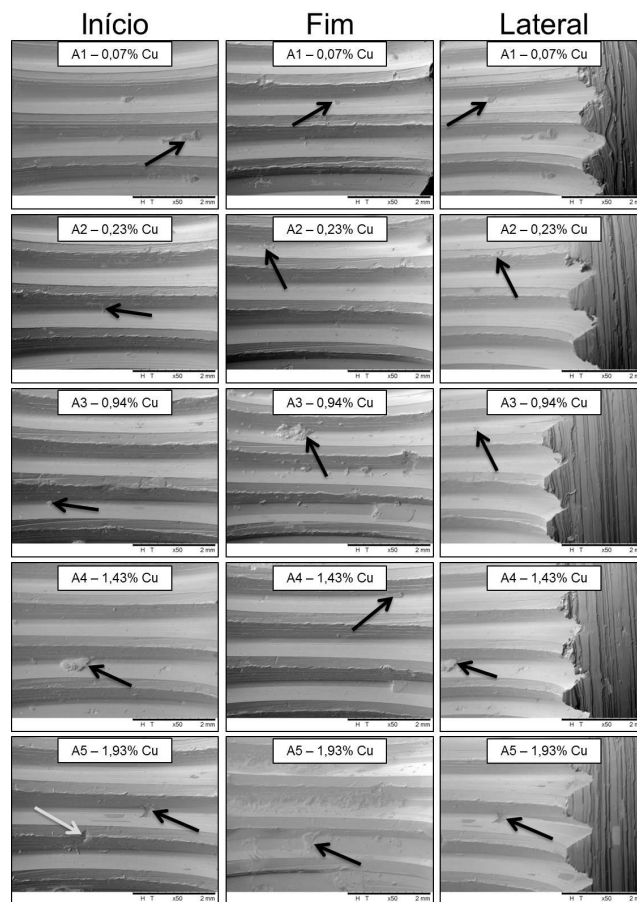


Figura 4. Imagens obtidas por MEV dos filetes das roscas produzidas no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

### 3.5. Alterações Subsuperficiais

Na Figura 5 são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal das roscas para análise de alterações subsuperficiais durante o rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x. A partir da figura, principalmente no aumento de 500x é possível perceber uma pequena camada de material deformado próxima à superfície dos filetes das roscas. Fazendo uma análise visual, aparentemente esta deformação se apresentou de maneira mais evidente para as amostras A2, A3 e A4.

A fim de comprovar e tentar quantificar esta deformação plástica (zona afetada pelo corte) foram realizados ensaios de microdureza. Doze indentações foram realizadas na seção de um filete e mais três indentações entre dois filetes

partindo da superfície usinada em direção ao centro do material. Os valores de microdureza obtidos em diferentes posições do filete da rosca são apresentados na Figura 6.

A partir da Figura 6 é possível observar que os pontos de medição próximos às bordas do filete apresentaram maiores valores de microdureza para todas as amostras da liga de alumínio. Os pontos 1, 3, 4, 7 e 12 são exemplos destes pontos. Além disso, estes valores de microdureza obtidos são maiores que a microdureza média de cada amostra. Tomando o ponto 1 como exemplo, na amostra 5 (1,93% Cu), a microdureza do ponto 1 foi 161 HV, enquanto sua microdureza média é 141,4 HV, resultando em um aumento de 14%.

Outra observação importante foram os valores de microdureza obtidos nos pontos 13, 14 e 15. Para todas as amostras ensaiadas foi verificado um decréscimo da microdureza à medida que se distancia da superfície usinada.

A razão mais provável pelo aumento da microdureza das amostras em regiões próximas às bordas do filete é a deformação plástica sofrida pelo material durante o rosqueamento. Esta deformação plástica, quando ocorre à temperatura abaixo da temperatura de recristalização do material, provoca o endurecimento do material devido à deformação plástica, fenômeno denominado encruamento.

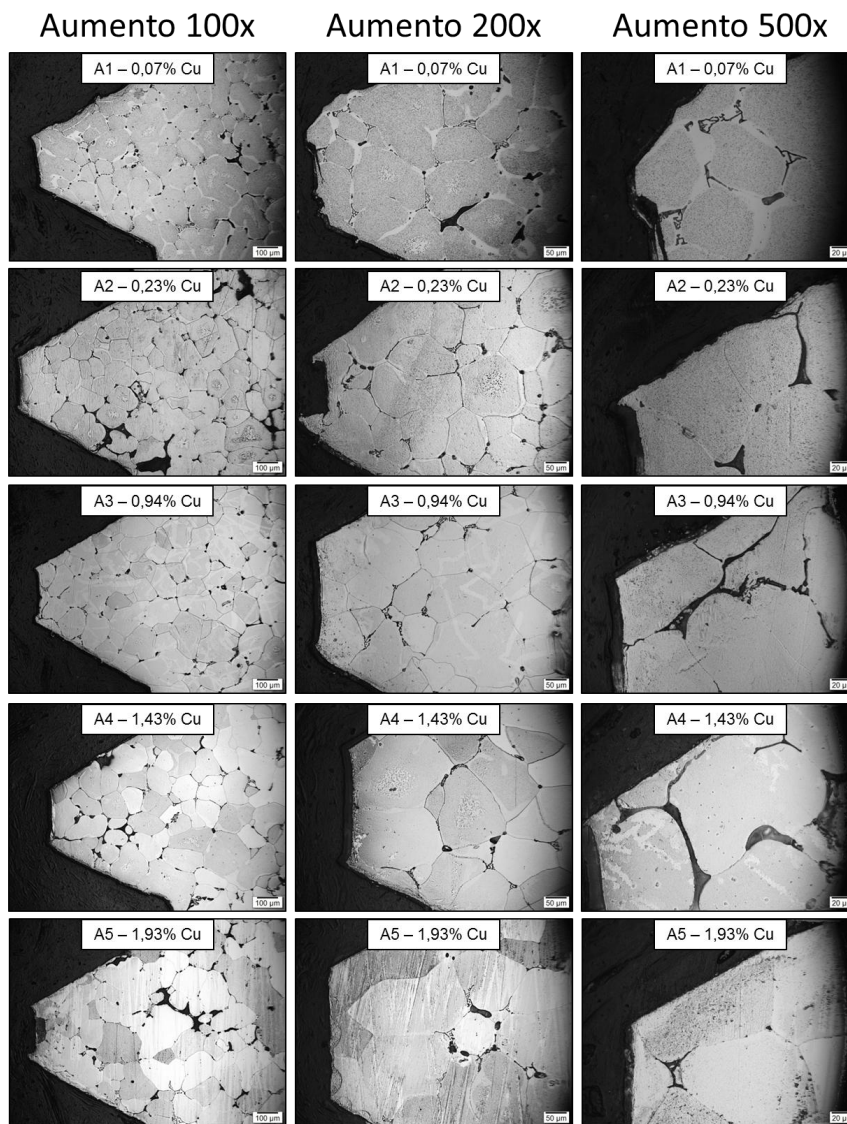


Figura 5. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal das roscas para análise de alterações subsuperficiais durante o rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x

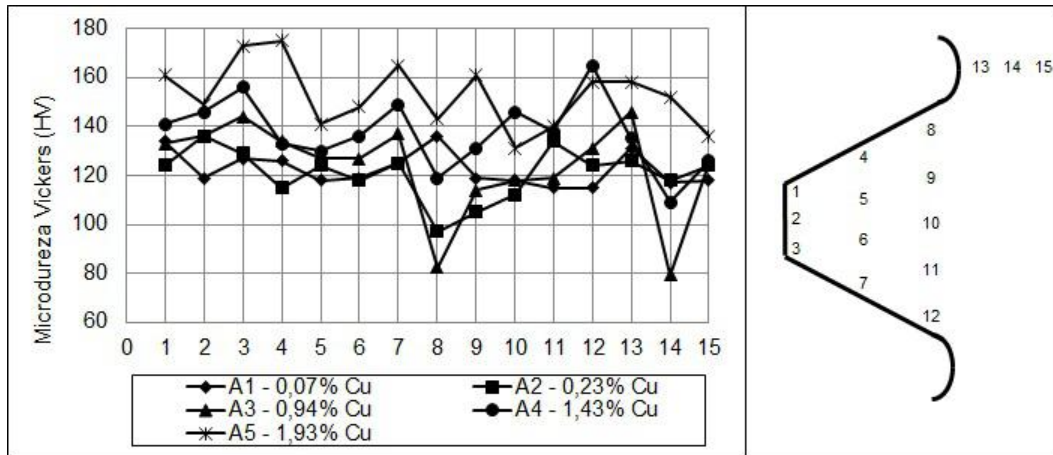


Figura 6. Microdureza Vickers em diferentes pontos de um filete de rosca gerado no processo de rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

## 5. CONCLUSÕES

A investigação acerca do efeito do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351 levou a conclusões importantes sobre o comportamento desta liga durante os ensaios de rosqueamento desenvolvidos no presente trabalho.

- O torque máximo na ferramenta de corte durante o processo de rosqueamento não sofreu influência significativa do aumento da velocidade de corte. Os menores valores do torque foram obtidos no rosqueamento das amostras A2 (0,23% Cu) e A3 (0,94% Cu).
- A partir de análise por MEV foi verificado que os filetes das roscas formadas no rosqueamento de todas as amostras se apresentaram íntegros e sem defeitos. Foi também identificada a presença de material aderido na forma de partículas e aglomerados nas roscas para todas as amostras rosqueadas.
- Já nos ensaios de microdureza foi observado endurecimento nas bordas do filete da rosca para todas as amostras ensaiadas, devido à deformação plástica sofrida durante o processo de rosqueamento.

## 6. REFERÊNCIAS

- ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook Vol2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10. ed. United States of America: ASM International, 1990a.
- ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook Vol. 16: Machining. 10. ed. United States of America: ASM International, 1990b.
- DA MOTA, P. R. Dissertação - Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- LU, T. et al. Optimizing the tensile properties of Al-11Si-0.3Mg alloys: Role of Cu addition. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 631, p. 276-282, 2015.
- MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- PEREIRA, I. C. Tese - Comparação entre os Processos de Rosqueamento Interno por Usinagem e Laminação. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- PEREIRA, I.; DA SILVA, M. B.; GUIMARÃES, V. Análise da usinabilidade através da força axial e do torque no rosqueamento de dois ferros fundidos cinzentos ligados ao CrCuSn e CrCuSnMo e um ferro fundido vermicular da classe 350. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais...Campina Grande-PB: 2010
- THE ALUMINUM ASSOCIATION. International Alloy Designation and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys Arlington, VA The Aluminum Association, Inc., , 2015.
- TIRYAKIOGLU, M.; STALEY, J. T. Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys. In: Handbook of Aluminum Vol.1 - Physical Metallurgy and Processes. 1. ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2003. p. 81-209.
- WANG, G. et al. Influence of Cu content on ageing behavior of AlSiMgCu cast alloys. *Materials and Design*, v. 28, n. 3, p. 1001-1005, 2007.
- WORLD ALUMINIUM. Primary Aluminium Production. Disponível em: <www.world-aluminum.org>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- ZEREN, M.; KARAKULAK, E.; GÜMÜS, S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, v. 21, n. 8, p. 1698-1702, 2011.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

### **Influence of Cooper Addition in Tapping Process of Al-Si-Mg Alloy**

**Ricardo Augusto Gonçalves**

Federal University of Valleys of Jequitinhonha and Mucuri, JK Campus, Highway MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, ZIP: 39100-000  
ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br

**Márcio Bacci da Silva**

**Éder Silva Costa**

Federal University of Uberlândia, Avenue João Naves de Ávila nº 2121, Santa Mônica Campus, Uberlândia/MG, ZIP: 38408-100  
mbacci@mecanica.ufu.br  
eder@mecanica.ufu.br

***Abstract.** Adding copper to Al-Si-Mg alloys provides aluminum alloys with a large range of properties and applications. Thus, this study investigates de role of copper addition in an Al-Si-Mg aluminum alloy (6351) machinability. The machinability was evaluated during tapping process from tapping torque, thread analysis and sub-surface modifications. The tapping tests were carried out using a HSS tap with helical flutes in a range of five levels of cutting speed. The samples were produced with five levels of copper (0.07%, 0.23%, 0.94%, 1.43% and 1.93%) and have chemical composition of the other alloying elements practically constant within the recommended range by The Aluminum Association for this alloy. The major amounts of copper resulted in significant increase in microhardness, hardness and ultimate tensile strength of the aluminum alloy, while elongation after fracture decreased. The results showed the influence of copper addition to this aluminum alloy machinability. Lower values of torque were obtained increasing copper content in Al-Si-Mg alloy studied. Also, it can be observed strain hardening close to machined surface promoted by the tapping process.*

***Keywords:** copper, tapping, Al-Si-Mg aluminum alloy, machinability*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.