

INFLUÊNCIA DO TEOR DE COBRE NA USINAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351

Ricardo Augusto Gonçalves, Lepu/UFU, ricardo_eng_mec@hotmail.com
Márcio Bacci da Silva, Lepu/UFU, mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo. As ligas de alumínio tiveram sua utilização aumentada na indústria nos últimos anos, principalmente em aplicações nas áreas aeronáutica e automobilística, sendo a maioria das peças fabricadas por processos de usinagem. O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência do teor de cobre na usinagem da liga de alumínio 6351. A usinabilidade será investigada a partir de medições de torque e força de avanço na ferramenta de corte durante o processo de furação. As amostras da liga de alumínio 6351 foram produzidas com diferentes teores 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 ASTM. As amostras foram submetidas ao tratamento térmico T6 (solubilizadas e envelhecidas artificialmente). Os ensaios mostraram que o aumento do teor de cobre presente na liga de alumínio 6351 garantiram maiores valores de torque e força de avanço durante a sua usinagem.

Palavras chave: Liga de Alumínio 6351, Cobre, Torque, Força de Avanço

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos materiais metálicos mais utilizados na indústria metal-mecânica e sua utilização tem aumentado bastante nas áreas aeronáutica e automobilística. Leveza, boa condutividade, resistência mecânica e boa usinabilidade são algumas das propriedades deste material que melhoraram sua participação no mercado. O alumínio devido às suas excelentes qualidades tem tomado lugar importante em aplicações de engenharia, tornando-se o metal não-ferroso mais produzido na indústria metal-mecânica. Dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) revelam que só no Brasil no ano de 2012 foi produzido um total de 1436,4 mil toneladas de alumínio.

Ligas da série 6XXX contêm silício e magnésio aproximadamente nas proporções requeridas para a formação do silicato de magnésio (Mg_2Si), assim tornando-as tratáveis termicamente. Apesar de não ser tão resistente quanto as ligas das séries 2XXX e 7XXX, ligas da série 6XXX tem boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência a corrosão, com média resistência mecânica. Ligas neste grupo podem ser conformadas na têmpera T4 (tratada termicamente por solução, mas não por precipitação) e endurecidas após a conformação às propriedades do T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) pelo tratamento térmico por precipitação. As utilizações incluem aplicações arquitetônicas, quadros de bicicleta, equipamentos de transporte, grades de ponte e estruturas soldadas (METALS HANDBOOK, 1992).

A liga 6351 assim como as ligas 6082 e 6005A também da série 6XXX contém uma quantidade de Mg_2Si superior às ligas 6063 e 6061, mas com um substancial excesso de silício. Um excesso de 0,2% de Si aumenta a resistência de uma liga contendo 0,8% de Mg_2Si em cerca de 70 MPa (Handbook of Aluminum, 1996).

Quando Cu é adicionado às ligas da série 6XXX Al-Mg-Si ou Si é adicionado à ligas da série 2XXX ou ligas fundidas Al-Cu-Mg, a família de ligas Al-Mg-Si-Cu é formada com várias propriedades e aplicações. A resposta ao envelhecimento nestas ligas frequentemente parece ser um pouco complexa, devido à ocorrência de muitas fases intermediárias. Grandes aumentos na resistência podem ser obtidos adicionando Cu em ligas Al-Mg-Si, acompanhados por considerável refinamento na estrutura do precipitado (Handbook of Aluminum, 1996).

2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram utilizadas cinco barras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. A composição química das amostras é apresentada na Tab. 1. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de furação foram confeccionados com as dimensões 150 mm x 40 mm x 28 mm.

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

ID	Liga	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Amostra 1	6351	98,06	0,80	0,19	0,07	0,44	0,40	0,003	0,006	0,026
Amostra 2		97,92	0,77	0,17	0,23	0,48	0,41	0,003	0,006	0,030
Amostra 3		97,02	0,88	0,21	0,94	0,50	0,41	0,003	0,006	0,026

Amostra 4	96,54	0,88	0,21	1,43	0,49	0,41	0,003	0,005	0,030
Amostra 5	96,06	0,87	0,21	1,93	0,49	0,40	0,003	0,005	0,027
(*) ASTM	-	0,7-1,3	0,5	0,10	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2

(*) valor de referencia relativo à norma ABNT ISO 209:2010

Os testes de furação foram realizados em um Centro de Usinagem Discovery 760, 10.000 rpm. A ferramenta utilizada foi uma broca Dormer A9201/4 HSS-Co com 6,35 mm de diâmetro. Os testes foram realizados com fluido de corte aplicado na forma de jorro. O fluido utilizado foi uma emulsão de óleo de base vegetal Vasco1000 com concentração de 7%. O aparato para a medição de torque e força utilizado consiste de um dinamômetro rotativo Kistler, modelo 9123C1211, amplificador e condicionador de sinais, modelo 5019A, fabricado pela Kistler Instruments, placa de aquisição de sinais da National Instrument, modelo: NI PCI-6036E e software da National Instrument, Labview 7.6. Na Fig. 1 são apresentados a ferramenta de corte, corpo de prova e dinamômetro rotativo montados na máquina.

Os parâmetros de corte velocidade de corte e avanço foram variados em cinco níveis (60 a 100 m/min e 0,1 a 0,3 mm/rev). Para cada condição foi realizado um teste com duas repetições, sendo apresentada nos resultados a média dos sinais de torque e força de avanço obtidos.



Figura 1. Ferramenta de corte e corpo de prova montados na máquina.

Jaafar et. al (2011) investigou o efeito do teor de Mg, Si e Cu no desenvolvimento microestrutural durante o envelhecimento de ligas de alumínio da série 6XXX. Segundo os autores os precipitados formados em ligas envelhecidas artificialmente foram em sua maioria na forma de agulha (needle-shaped). A densidade do número de precipitados aumenta à medida que o teor de soluto de Mg_2Si e excesso de Si aumentam. A adição de Cu (0,1% em peso) resultou em refinamento dos precipitados em forma de agulha e pode também ter aumentado a densidade do número de precipitados.

Zeren (2005) investigou o efeito do teor de cobre e silício nas propriedades mecânicas de ligas Al-Cu-Si-Mg. Para isso foram utilizadas ligas Al-Cu-Si-Mg com 1, 3, 4, 5, 6% Cu e 0, 5, 7, 12, 18% Si. Segundo o autor as propriedades mecânicas das ligas Al-Cu-Si-Mg dependem largamente do tratamento térmico. Assim, as características do tratamento térmico desempenham um papel vital para uma boa combinação de microestrutura e propriedades mecânicas. O teor de cobre em ligas Al-Cu-Si-Mg afeta as propriedades mecânicas. Aumentando o teor de cobre, resistência à tração e dureza aumentam devido ao endurecimento por precipitação; e o alongamento diminui. Aumentando o teor de cobre de 1 para 6%, a resistência a tração aumenta de 152 para 402 MPa e a dureza aumenta de 45 para 118 HB.

3. RESULTADOS

A dureza Vickers (HV) média da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre apresentada na Tab. 2 foi obtida através da média de cinco indentações. Quanto maior o teor de cobre presente na liga de alumínio maior a dureza da mesma. Por meio de uma análise de variância Anova (Tab. 3) foi possível comprovar estatisticamente com 5% de significância que a dureza de pelo menos uma das ligas em questão é diferente.

Tabela 2. Dureza Vickers média da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

Liga	1	2	3	4	5
HV	107,7	108	112	121	125

Tabela 3. Tabela de ANOVA do efeito do teor de cobre na dureza Vickers da liga de alumínio 6351.

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	6,111946	1	6,111946	100,7076	0,000168
HV	7,194990	9	0,799443	13,1726	0,005539
Error	0,303450	5	0,060690		

As médias do torque obtidos nos ensaios são apresentadas nos gráficos a seguir. Na Fig. 2 é apresentada a variação do torque com o aumento da velocidade de corte. Não é possível observar alguma tendência de aumento ou diminuição. Para praticamente todas as velocidades de corte a liga com 0,23%Cu de dureza intermediária foi a que gerou menores valores de torque durante a usinagem.

Na Fig. 3 é apresentada a variação do torque com o aumento do avanço. Neste caso pode ser claramente observado que o aumento do avanço causa um aumento praticamente linear do torque na ferramenta durante a furação, apresentando valores de 0,6 N.m para o menor avanço de corte (0,1 mm/rev) e atingindo valores entre 1,4 e 1,6 N.m para o maior avanço de corte (0,3 mm/rev). Porém não existe uma diferença pronunciada nos valores de torque obtido pelas ligas com diferentes teores de cobre.

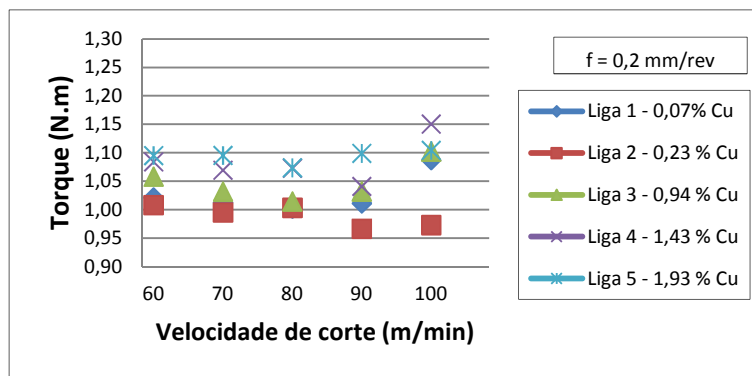


Figura 2. Torque (N.m) versus velocidade de corte (m/min).

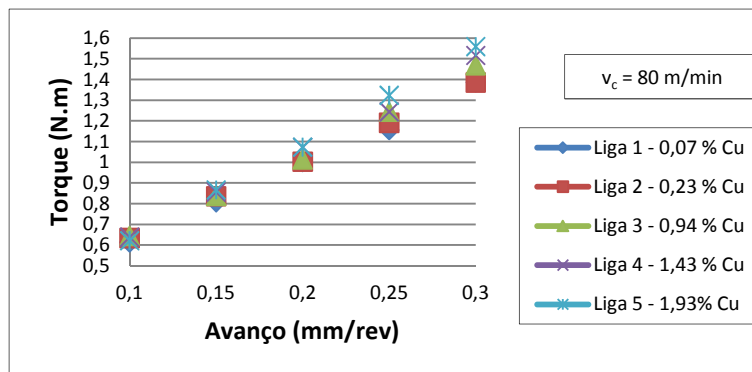


Figura 3. Torque (N/m) versus avanço (mm/rev).

A força de avanço média obtida nos ensaios é apresentada nas figuras 4 e 5. Na Fig. 4 não é perceptível uma variação da força de avanço com o aumento da velocidade de corte na furação. É possível observar que as ligas 4 e 5 com maior teor de cobre proporcionaram maiores valores da força de avanço.

Já na Fig. 5 é apresentada a variação da força de avanço em função do aumento do avanço de corte. O aumento do avanço aumenta a seção da área de material a ser cisalhado, e desta forma, a força de avanço aumenta de maneira quase linear. Novamente as amostras com maior teor de cobre, e consequentemente maior dureza, apresentaram maiores valores de força de avanço.

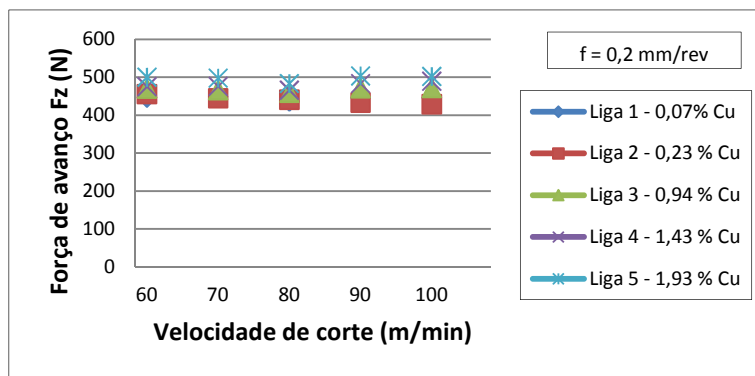


Figura 4. Força de avanço F_z (N) versus velocidade de corte (m/min).

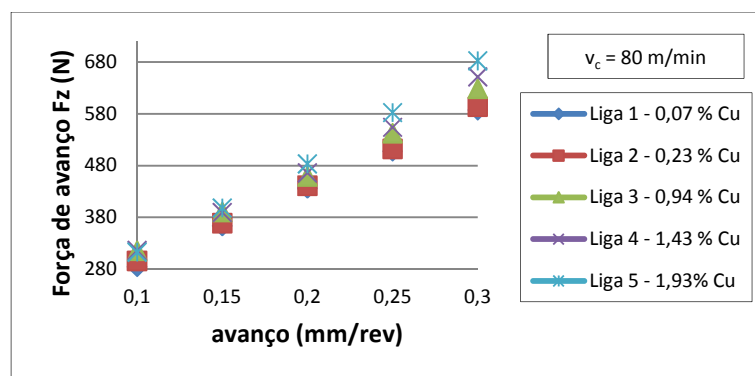


Figura 5. Força de avanço F_z (N) versus avanço (mm/rev).

Com base nos resultados obtidos aparentemente as amostras da liga de alumínio 6351 com maior teor de cobre apresentaram maiores valores de torque e força de avanço. É preciso fazer uma investigação mais detalhada das alterações metalúrgicas causadas pelas diferentes adições do cobre e também uma análise estatística dos dados a fim de comprovar as diferentes respostas das amostras da liga de alumínio durante a usinagem.

4. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de furação realizados nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre podem se apresentar algumas conclusões importantes:

Quanto maior o teor de cobre presente na liga de alumínio 6351 maior a dureza da mesma.

Torque e a força de avanço durante a furação aumentaram de maneira linear com o aumento do avanço de corte.

Amostras da liga de alumínio com maior teor de cobre implicaram em maiores valores de torque e força de avanço durante o processo de furação.

5. REFERÊNCIAS

ASM METALS HANDBOOK – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 02x21, 10ª Edition, 1992. 3470 p.

HANDBOOK OF ALUMINUM, Physical Metallurgy and Processes, Volume 1, 1996. 1309 p.

JAAFAR, A.; RAHMAT, A.; HUSSAIN, Z.; ZAINOL, I. “Effect of Mg, Si and Cu content on the microstructure of dilute 6000 series aluminium alloys, Journal of Alloys and Compounds”, 2011.

ZEREN, M. “Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al-Cu-Si-Mg”, Journal of Materials Processing Technology, 2005.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.