

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE CAVACOS E REBARBAS E ALTERAÇÕES SUBSUPERFICIAIS NA FURAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351 COM DIFERENTES ADIÇÕES DE COBRE

Ricardo Augusto Gonçalves, ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br¹

Márcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br²

Éder Silva Costa, eder@mecanica.ufu.br²

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK, Rodovia MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP: 39100-000

²Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila nº 2121, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, CEP: 38408-100

Resumo: Este trabalho tem como objetivo principal investigar a influência da adição de cobre na liga de alumínio 6351 sobre a formação de cavacos e rebarbas; e alterações subsuperficiais no processo de furação. Foram utilizadas cinco amostras da liga de alumínio 6351 com cinco adições de cobre (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93%) e tratamento térmico T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) especialmente fabricadas pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) para este trabalho (não são ligas comerciais). As propriedades mecânicas das amostras foram avaliadas a partir de ensaios de dureza, microdureza, tração e impacto. Além disso, foram realizadas análises microestruturais das amostras por meio de microscopia ótica e de varredura eletrônica, equipada com sistema de espectroscopia por dispersão de energia de raios-x (EDS). Os ensaios de usinagem foram realizados utilizando uma broca helicoidal de metal duro sem revestimento com os parâmetros de corte fixos $v_c = 50\text{m/min}$ e $f = 0,25\text{ mm/rot}$. Os cavacos foram analisados com base na sua morfologia e tamanho. Ainda foi realizada uma estimativa da facilidade da quebra dos cavacos por meio da relação número de cavacos por grama. Já as rebarbas foram analisadas em função da máxima altura da rebarba obtida tanto na entrada quanto na saída do furo. Já a análise de alterações subsuperficiais foi realizada a partir de análises microestruturais e microdureza. Os resultados mostraram que, em geral, o aumento do teor de cobre presente na liga 6351 implicou em aumento de sua dureza e resistência mecânica, devido ao aumento da microdureza da matriz e da partícula de segunda fase endurecedora; e ao mesmo tempo na diminuição de sua capacidade de alongamento. A adição de cobre de 0,23% facilitou a quebra dos cavacos. Já o aumento da quantidade de cobre de 0,07% para 1,93%, provocou decréscimo na máxima altura das rebarbas de entrada e saída obtidas de cerca de 50% e 30%, respectivamente.

Palavras-chave: cavacos, rebarbas, liga de alumínio 6351, alterações subsuperficiais, cobre

1. INTRODUÇÃO

Em operações de corte, além de uma satisfatória formação de cavacos, espera-se de um processo a geração de superfícies com dimensões e acabamentos especificados no projeto. Porém, devido a diversos fatores, na prática as dimensões e acabamento obtidos em praticamente todos os processos de fabricação apresentarão desvios. E quando se trata do acabamento de arestas de peças de utilização em engenharia grande parte desses desvios pode ser representada pela formação de rebarbas. Porém, não existe um consenso sobre a identificação do que pode ser considerada rebarba.

Segundo Gillespie (1999), um dos maiores pesquisadores da área, o que constitui uma peça “livre de rebarbas” varia de acordo com companhias e departamentos de qualidade. Para alguns, significa não haver materiais soltos em uma aresta. Para outros significa não haver nada visível a olho nu ou uma condição de aresta que não cause nenhum problema no próximo processo de montagem. Material residual em uma aresta pode ou não ser chamado de rebarba. Em muitos casos, as rebarbas são definidas como projeções indesejadas de material, formados como resultado de fluxo plástico em operações de corte e cisalhamento (AURICH et al., 2009). Além disso, não existe uma padronização de medição e dimensões de rebarbas.

Ainda sobre as rebarbas, de acordo com Aurich et al. (2009), estudos têm mostrado um grande impacto econômico das rebarbas e seus efeitos. A rebarbação é não apenas um processo que não agrega valor ao produto, mas também, em muitos casos o aumento da formação de rebarbas é um fator chave no desgaste das ferramentas de corte. A forma da rebarba é importante por causa do seu tamanho. Consequentemente, o custo da rebarbação é grandemente dependente de sua forma (KIM; MIN; DORNFELD, 2001). A formação de rebarbas pode resultar na substituição de ferramentas que caso contrário ainda estariam operando sem problemas. Controle e remoção de rebarbas são algumas das questões econômicas mais importantes em várias operações de usinagem e tem sido foco de pesquisa em operações de corte pelos últimos 50 anos (AURICH et al., 2009).

De acordo com Machado et al. (2011), a condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais, reações

químicas, etc. Assim, o estudo da integridade superficial de uma peça usinada engloba tanto o acabamento como também as alterações subsuperficiais provocadas pelo processo de usinagem.

Quando o cobre é adicionado às ligas de alumínio da série 6XXX, ou silício é adicionado às ligas da série 2XXX, a família de ligas Al-Mg-Si-Cu é formada com propriedades e aplicações variadas. O conjunto de ligas extrudadas Al-Mg-Si-Cu são largamente utilizadas nas indústrias automotiva, aeronáutica e ferroviária devido às suas atrativas propriedades mecânicas após o tratamento de envelhecimento artificial (YIN et al., 2016). A resposta ao envelhecimento nestas ligas geralmente 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 (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003).

Na literatura existem dados disponíveis acerca de como a adição de cobre influencia as propriedades mecânicas das ligas de alumínio Al-Si-Mg. Além disso, também existem alguns trabalhos sobre a influência do cobre na usinabilidade de outras ligas de alumínio. Porém, maior investigação e conhecimento são necessários para esclarecer como a adição de cobre, e consequentemente, a modificação causada na microestrutura e propriedades mecânicas, podem influenciar o comportamento das ligas de alumínio Al-Si-Mg durante a usinagem.

Um dos maiores problemas na usinagem do alumínio é o controle do cavaco. Por ser um material dúctil, normalmente os cavacos obtidos são contínuos, de grande espessura, resistentes e difíceis de serem controlados. Devido à sua estrutura CFC, ocorrem maiores deformações antes da ruptura do metal. Em operações de usinagem como furação, alargamento ou rosqueamento, um projeto especial da ferramenta se torna necessário a fim de facilitar a remoção dos cavacos, minimizar rebarbas e evitar o entupimento dos canais. Normalmente são utilizados maiores ângulos de saída e quebra-cavacos. A forma do cavaco e sua capacidade de quebra são grandemente influenciadas pelo tipo da liga de alumínio utilizado e suas propriedades. Na operação de furação são desejáveis cavacos pequenos e satisfatoriamente quebrados. Pois, quanto maiores são os cavacos formados, estes não se movem facilmente pelos canais helicoidais. Isto pode provocar aumentos no torque aplicado na ferramenta de corte e porventura causar a quebra da broca (BATZER et al., 1998).

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é investigar a influência da adição de cobre na liga de alumínio 6351 sobre a formação de cavacos e rebarbas; e alterações subsuperficiais no processo de furação.

2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Cinco barras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre e tratamento térmico T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) foram especialmente fabricadas pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) para este trabalho (não são ligas comerciais). As amostras da liga de alumínio 6351 foram produzidas com diferentes teores de cobre (Cu) (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93 %), e possuem composições químicas dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro da faixa recomendada pela *Aluminum Association* para esta liga (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015). Esta recomendação da composição química das ligas de alumínio trabalháveis possui o acordo das principais associações de alumínio do mundo, inclusive a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. O intervalo de variação da composição química de cobre adicionada à liga de alumínio 6351 foi proposto pelo fabricante. A composição química das amostras é apresentada na Tab. (1).

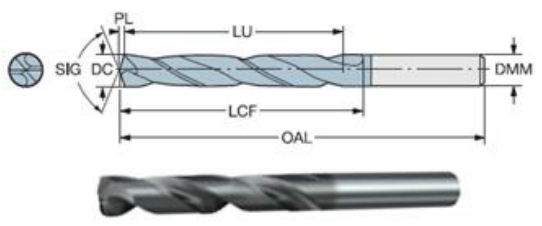
Tabela 1. Composição química das amostras da liga de alumínio 6351 (% em peso)

Amostras	Liga	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
A1	6351	98,06	0,80	0,19	0,07	0,44	0,40	0,003	0,006	0,026
A2		97,92	0,77	0,17	0,23	0,48	0,41	0,003	0,006	0,030
A3		97,02	0,88	0,21	0,94	0,50	0,41	0,003	0,006	0,026
A4		96,54	0,88	0,21	1,43	0,49	0,41	0,003	0,005	0,030
A5		96,06	0,87	0,21	1,93	0,49	0,40	0,003	0,005	0,027
(*) TAA		-	0,7-1,3	0,5	0,10	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2

(*) limites de composição química registrados pela *Aluminum Association* (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015)

Os ensaios de furação foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC Romi Discovery 760, de rotação máxima de 10.000 rpm. A ferramenta utilizada foi uma broca CoroDrill 460-XM Sandvik Coromant. Trata-se de uma broca inteira feita de metal duro e sem revestimento, com principais dimensões e ângulos apresentados na Tab. (2). Foi utilizada como fluido de corte uma emulsão à base de óleo mineral Blasocut 40 NF Blaser, com concentração de 7% e aplicada na forma de jorro. Os ensaios de furação foram realizados com velocidade de corte $v_c = 50$ m/min e avanço $f = 0,25$ mm/rot.

Tabela 2. Dimensões e ângulos da broca Corodril 460-XM utilizada nos ensaios de furação (SANDVIK, 2012)

Dimensão/Ângulo		
Diâmetro de corte (DC)	6,30 mm	
Comprimento útil (LU)	19 mm	
Diâmetro da haste (DMM)	8 mm	
Comprimento total (OAL)	79 mm	
Comprimento do canal para cavacos (LCF)	34 mm	
Comprimento da ponta (PL)	1,15 mm	
Ângulo de ponta (SIG)	140°	

Foram preparadas amostras das seções transversais dos furos a fim de verificar as alterações subsuperficiais próximas às paredes dos furos após a usinagem, como mostrado na Fig. (1). Todas estas amostras foram embutidas em uma embutidora Tempopress 2, lixadas e polidas utilizando óxido de cromo e sílica coloidal. Posteriormente foram submetidas a ataque químico utilizando o reagente Kellers (2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃ e 190 ml H₂O). A análise da microestrutura e das alterações subsuperficiais após a usinagem das amostras da liga de alumínio 6351 foi realizada em um microscópio ótico Olympus BX51M com o auxílio do software Olympus Stream Essentials. Além da análise microestrutural foram realizados ensaios de microdureza a partir de um microdurômetro HMV Shimadzu. As indentações foram realizadas com carga de 25 g e tempo de 15 s.

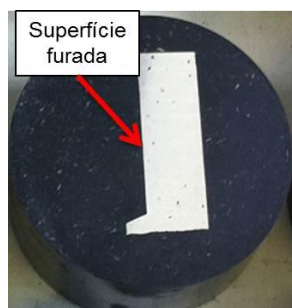


Figura 1. Amostra embutidas e polida para análise de alterações subsuperficiais durante os processos de furação

A fim de caracterizar as amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre, algumas propriedades mecânicas foram mensuradas. A dureza Vickers foi obtida em um durômetro Wolpert utilizando um penetrador piramidal de diamante de base quadrada, com carga de 20 kg e o tempo de indentação de 30 s. Para cada amostra foram realizadas vinte indentações e calculada a dureza média. A microdureza Vickers foi obtida a partir de um microdurômetro HMV Shimadzu com carga de 25 g e tempo de 15 s, sendo cinco indentações na fase da matriz de alumínio e cinco indentações na partícula de segunda fase encontrada nas amostras utilizadas. Também foram coletados valores de alongamento percentual após a ruptura e limite de resistência à tração. Os ensaios de tração foram realizados em três corpos de prova para cada amostra por meio de uma máquina universal de ensaios Shimadzu. Por fim, também foi medida a energia absorvida compensada em ensaios de impacto realizado em dois corpos de prova para cada amostra a partir de uma máquina para teste de impacto Charpy Equilam EQIM-C-300. Esta é a energia real absorvida no teste, levando em conta as energias de atrito do equipamento e a de gravidade. Para os ensaios realizados a aceleração da gravidade foi considerada de $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Para a análise das rebarbas formadas durante a furação foram utilizados corpos de prova com as dimensões 129 mm x 78 mm x 15 mm. Após a usinagem, os corpos de prova foram cortados com aproximadamente as dimensões 78 mm x 28 mm x 15 mm, conforme apresentado na Fig. (2).



Figura 2. Corpo de prova após ensaios de furação para análise de rebarbas

A análise dos cavacos formados durante o processo de furação das cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi realizada primeiramente com base em sua morfologia e tamanho. Além desta análise foi realizada uma estimativa da quantidade de cavacos por grama para cada amostra da liga utilizada. Este procedimento permitiu a avaliação da influência do teor de cobre na capacidade de quebra dos cavacos durante a usinagem das diferentes amostras da liga de alumínio. O parâmetro número de cavaco por grama foi estimado a partir da medição da massa de dez unidades de cavacos escolhidos aleatoriamente para cada uma das amostras. Após a medição, o cálculo foi realizado dividindo a massa mensurada por dez (unidades de cavacos).

Para a medição da massa dos cavacos foi utilizada uma balança semi analítica Shimadzu BL 3200 H, com resolução de 0,01 g e capacidade de medição de 3200 g, do Laboratório de Metrologia do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Para cada amostra da liga de alumínio foram realizadas dez medições da massa de dez unidades de cavacos. Desta forma, o valor médio do parâmetro número de cavacos por grama apresentado nos resultados corresponde a uma média de dez medições.

Já a análise das rebarbas obtidas no processo de furação foi realizada utilizando um microscópio ótico Olympus SZ61, com um aumento de 12x. As imagens foram capturadas por uma câmera PixeLINK PL-A662 e as medições realizadas a partir do software Image-Pro Express MediaCybernetics. Foi adotado como critério para a determinação das rebarbas, que qualquer material aderido à peça após a usinagem, foi considerado a rebarba. O parâmetro utilizado foi a altura da rebarba, tanto de entrada como de saída. A altura da rebarba corresponde à distância da superfície da peça até o ponto mais alto da rebarba, medida perpendicularmente à superfície da peça que foi submetida ao processo de furação, como mostrado na Fig. (3). A maior altura da rebarba foi coletada para cada furo analisando o mesmo por duas vistas laterais diferentes. Como para cada amostra da liga de alumínio 6351 foram realizados três furos, os resultados apresentados correspondem à média dos seis valores obtidos da máxima altura das rebarbas de cada furo. As rebarbas foram avaliadas tanto em função da máxima altura como também da sua morfologia.

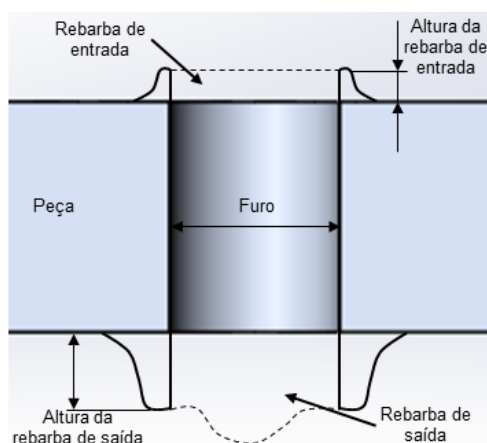


Figura 3. Esquema de medição da altura das rebarbas de entrada e saída na furação

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades Mecânicas

Na Tabela (3) são apresentadas as propriedades mecânicas medidas das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

Tabela 3. 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

A partir da Tabela (3) é possível observar que a dureza média da liga de alumínio aumentou com o aumento do teor de cobre, até 1,43% de cobre. Para o maior nível de cobre utilizado (1,93%) a dureza não seguiu a tendência de

aumento. Um aumento neste teor de 0,07% a 1,43% provocou um aumento de 16% na dureza média da liga de alumínio 6351 (100,4 HV para 116,8 HV). Este aumento na dureza da liga de alumínio 6351 tratada termicamente com o aumento do teor de cobre (até 1,43% Cu), se deve provavelmente ao endurecimento por solução sólida promovido pelo cobre na matriz de alumínio, como verificado por Wang et al. (2007). O cobre quando em solução sólida causa deformação do reticulado cristalino, o que representa uma barreira ao movimento de discordâncias. Além disso, o aumento da dureza consequente da maior quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio também se deve à precipitação de fases como CuAl_2 após o tratamento térmico de envelhecimento (ZEREN et al., 2011).

O aumento do teor de cobre de 0,07% Cu para 1,93% Cu provocou também, em média, aumento na microdureza da matriz de alumínio de 121 HV para 141 HV. Isto representa um aumento percentual de aproximadamente 17%. Ao mesmo tempo, a microdureza na partícula de segunda fase aumentou em média de 125 HV para 184 HV comparando a amostra A1 com a amostra A5. Este aumento representa cerca de 50% de aumento na microdureza. Segundo Yang et al. (2011) a distorção do reticulado cristalino, resultado da dissolução de elementos de liga, produz uma espécie de campo de tensão. Este campo de tensão pode interagir com discordâncias, impedindo seu movimento. Assim, isto significativamente aumenta a microdureza. Portanto, quando dissolvidos na matriz de alumínio ou precipitados, os elementos de liga incluindo o cobre, elevam a microdureza da liga de alumínio 6351.

Ainda de acordo com a Tabela (3) pode ser verificado que o aumento no teor de cobre de 0,07% até 1,93% significou em aumento na resistência mecânica em cerca de 7% (251,3 MPa para 268,7 MPa). Já o alongamento percentual após a ruptura, e consequentemente a ductilidade, sofreu decréscimo de cerca de 20% (6,11% para 4,88%), na comparação entre as amostras A1 e A5. Na condição de tratada por solubilização, uma alta e uniforme concentração de cobre referente à dissolução de fases CuAl_2 podem promover a resistência à tração em detrimento do alongamento (LU et al., 2015).

Por fim, os valores médios obtidos da energia absorvida compensada se apresentaram bem próximos, variando entre um menor valor de 3,11 J para a amostra A2 (0,23% Cu) até o maior valor de 4,40 J para a amostra A4 (1,43% Cu). Quanto menor for esta energia absorvida, menor será a tenacidade à fratura por impacto do material. Assim, uma trinca originada no material se propagará mais facilmente provocando a fratura. Segundo Ibrahim et al. (2011) o cobre diminui a tenacidade à fratura de ligas Al-Si-Cu-Mg, especialmente sob condições do tratamento térmico T6.

3.2. Formação dos cavacos

Os cavacos obtidos na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentados na Fig. (4). De acordo com a figura, os cavacos formados na usinagem de todas as amostras se apresentaram predominantemente em forma de leque (*fan shaped chips*). Apenas poucos cavacos se aproximaram do formato cônico. Segundo Batzer et al. (1998), a forma em leque é considerada a forma ideal de cavaco para a maioria de aplicações em furação. De acordo com estes autores, o cavaco na forma de leque é formado quando cavacos cônicos não puderam se curvar suficientemente para acompanhar a hélice do canal helicoidal da broca. Assim, ele se fratura previamente à uma revolução completa da ferramenta de corte.

Já em relação ao tamanho dos cavacos apresentados pelas amostras com diferentes quantidades de cobre, não é evidente uma tendência de aumento ou diminuição dos cavacos com o aumento da quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. As amostras 4 e 5 com maiores quantidades de cobre (1,43% Cu e 1,93% Cu), que são as amostras com menor capacidade de deformação (4,95% e 4,88%), aparentemente apresentaram cavacos menores.

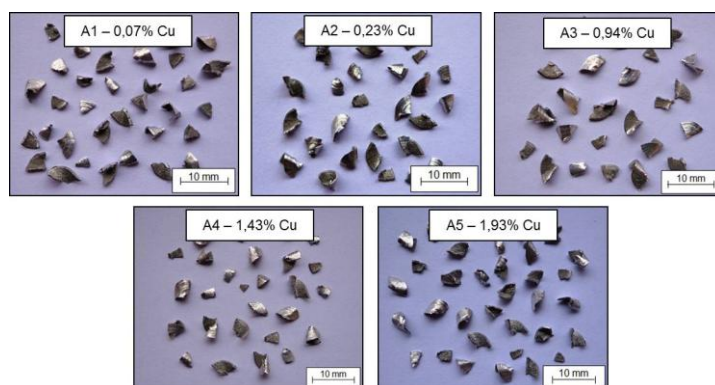


Figura 4. Cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

A diferença da morfologia dos cavacos também foi investigada a partir do parâmetro número de cavacos por grama. Este parâmetro avalia a capacidade de quebra dos cavacos na furação das diferentes amostras da liga estudada. Desta forma, quanto maior o valor do parâmetro cavacos/grama, maior será a capacidade de quebra do cavaco. Consequentemente, menor será o tamanho médio dos cavacos gerados.

Na Figura (5) são apresentados os valores médios do número de cavacos por grama, com intervalo de confiança de 95%, na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Em média, a amostra A2 (0,23% Cu) foi a que apresentou o maior valor de número de cavacos por grama obtidos na furação. Apesar da amostra 2 ser uma das amostras da liga de alumínio estudada que apresenta uma das maiores capacidades de deformação, esta amostra apresentou em média o menor valor de energia absorvida compensada nos ensaios de impacto. Assim, trincas formadas na ponta da ferramenta de corte provavelmente se propagaram mais facilmente pelo plano de cisalhamento primário, provocando a maior ruptura dos cavacos na furação da amostra 2. Por outro lado, a amostra A1 (0,07% Cu), que possui o teor de cobre mais próximo da liga 6351 comercial (0,10% Cu), foi a que resultou em média no menor valor de número de cavacos por grama. Além disso, para as amostras com teor de cobre acima de 0,23% foi possível observar uma tendência de diminuição do número de cavacos por grama quando se aumentou a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351.

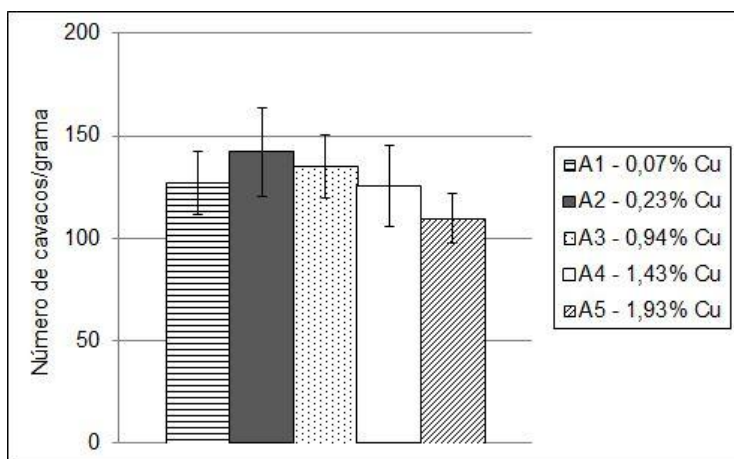


Figura 5. Número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

3.3. Formação de rebarbas

As rebarbas de entrada e saída formadas na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de cobre são apresentadas na Fig. (6). Na entrada do furo foram geradas rebarbas, mesmo que de pequenas dimensões, em todas as amostras da liga usinada. Segundo a classificação proposta por Kim, Min e Dornfeld (2001) as rebarbas de entrada formadas podem ser classificadas como do tipo rebarba uniforme pequena. Por outro lado, as rebarbas de saída formadas durante a furação de todas as amostras ensaiadas podem ser classificadas em rebarbas do tipo transiente. A rebarba transiente é um tipo de rebarba formada em um estágio transiente entre a rebarba uniforme e a rebarba do tipo coroa. Uma fratura inicial ocorre próxima ao final das arestas de corte da broca, similarmente ao que acontece à rebarba uniforme. Porém, esta fratura ocorre mais tarde que na formação da rebarba uniforme, criando uma seção uniforme maior. Como a broca avança ainda mais, a tensão na aresta tangencial da broca excede a tensão de ruptura do material. Assim, a fratura da rebarba do tipo coroa ocorre (KIM; MIN; DORNFELD, 2001).

Já na Figura (7) são apresentadas as médias dos valores da máxima altura da rebarba de entrada formadas na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. A amostra 1 (0,07% Cu), com maior capacidade de alongamento, apresentou em média o maior valor da altura da rebarba de entrada ($h_e = 0,199$ mm). A altura da rebarba de entrada sofreu decréscimo, de cerca de 50%, à medida que se aumentou a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. O menor valor da altura da rebarba de entrada ($h_e = 0,106$ mm) foi apresentada pela amostra 5 (1,93% Cu), que possui o menor valor de alongamento percentual após a ruptura dentre as amostras ensaiadas. As propriedades das amostras da liga de alumínio 6351, principalmente a ductilidade, provavelmente é a razão principal para este comportamento.

Na Figura (8) são apresentadas as médias dos valores da máxima altura da rebarba de saída formadas na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. As amostras 1 e 2, com as menores adições de cobre (0,07% Cu e 0,23% Cu) resultaram em média em maiores alturas da rebarba de saída no processo de furação, de aproximadamente $h_s = 3,40$ mm. Estas amostras são as amostras mais dúcteis dentre as amostras estudadas. Quando se aumenta a quantidade de cobre na liga de alumínio até 1,93% Cu foi observada a diminuição (de cerca de 30%) da altura da rebarba de saída para cerca de $h_s = 2,33$ mm. Porém, a amostra 3, com nível intermediário de cobre (0,94% Cu) foi a que resultou em média na menor altura da rebarba de saída. De maneira geral, é possível dizer que quanto maior a quantidade de cobre presente na liga de alumínio 6351, em média, menor foi a altura da rebarba de saída no processo de furação. Como os intervalos de confiança dos resultados obtidos se sobrepõem não é possível precisar se a quantidade de cobre de 0,94% Cu foi uma exceção à tendência de diminuição da altura da rebarba de saída com o aumento do teor de cobre.

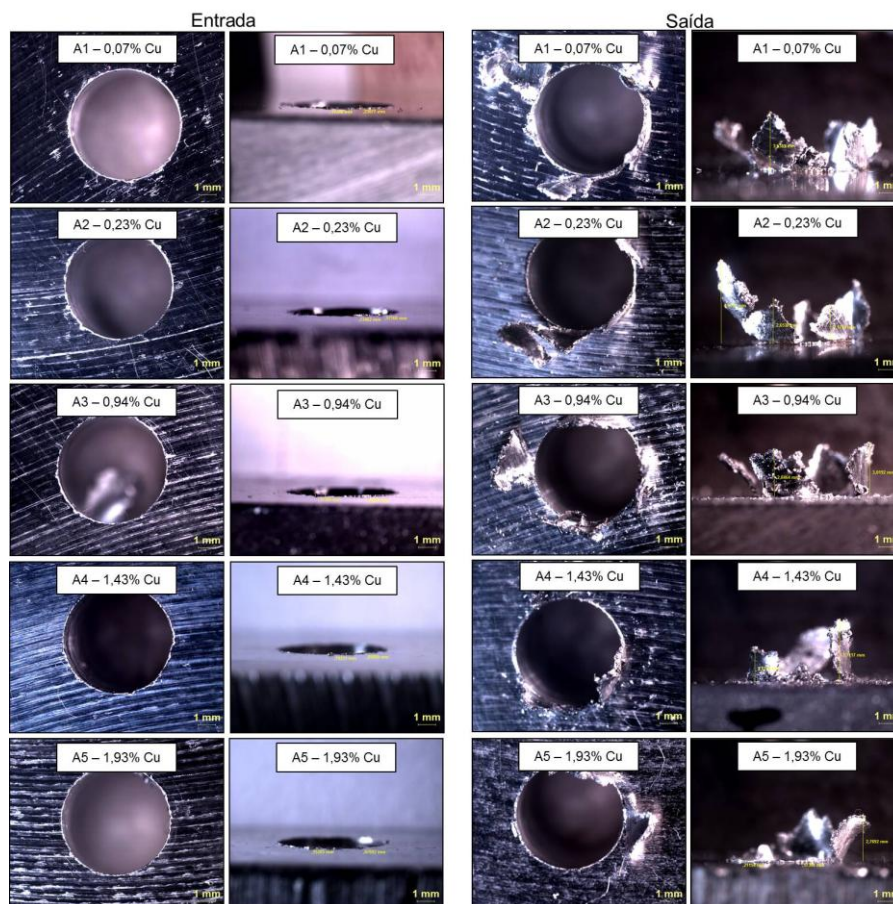


Figura 6. Vistas frontal e lateral das rebarbas de entrada e saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

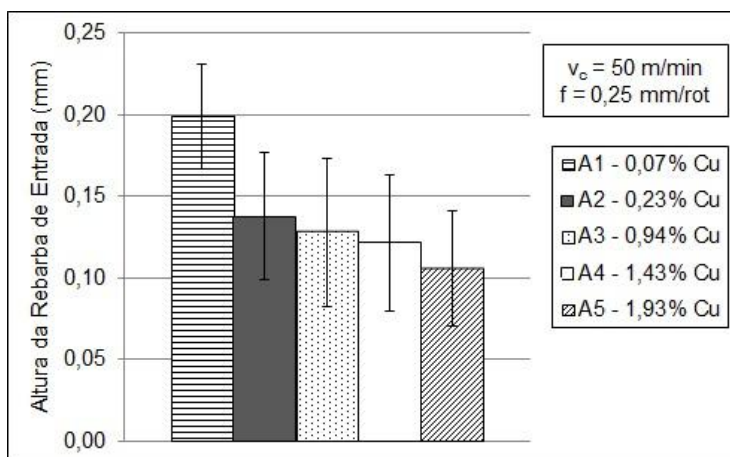


Figura 7. Altura da rebarba de entrada formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

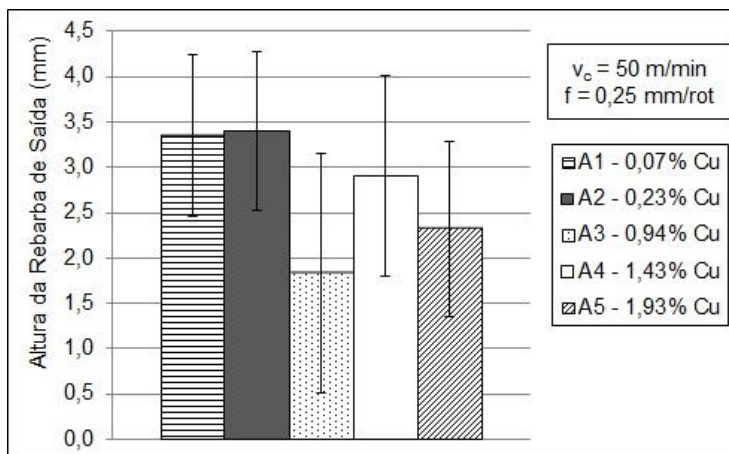


Figura 8. Altura da rebarba de saída formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

3.4. Alterações subsuperficiais

Na Figura (9) são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x. Ao analisar principalmente as micrografias realizadas com aumento de 500x fica evidente uma pequena faixa de deformação plástica próxima à superfície usinada. Esta deformação representa uma zona afetada pelo corte. Neste trabalho o tamanho desta zona de deformação não foi medida. A partir da escala das micrografias, aparentemente esta deformação ficou restrita a uma pequena faixa de aproximadamente 5µm a 10µm. A amostra 2 (0,23% Cu), que apresentou em média um dos maiores valores de alongamento (5,91%), visualmente apresentou maior quantidade de deformação microestrutural próxima à superfície usinada. Ao mesmo tempo, as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) também apresentaram uma zona afetada pelo corte evidente. Em contrapartida, a amostra 5 (1,93% Cu) de menor alongamento (4,88%), visualmente foi a amostra que sofreu menor deformação após a furação. Já na amostra 1 (0,07% Cu) não ficou evidente a deformação microestrutural caracterizando a zona afetada pelo corte.

Com o intuito de comprovar e tentar quantificar esta deformação plástica (zona afetada pelo corte) foram realizados ensaios de microdureza. Cinco indentações foram realizadas partindo da superfície usinada em direção ao interior do material. Os valores de microdureza obtidos são apresentados na Fig. (10). Foi observado que a amostra 1 (0,07% Cu) apresentou um amolecimento próximo à superfície usinada. Para a amostra 1, a microdureza à 15 µm da superfície usinada (83,2 HV) foi cerca de 30% menor que a microdureza média do material (121,2 HV). Esta diminuição da microdureza provavelmente foi causada pelo aquecimento devido à geração de calor durante o processo de furação.

Já as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu) apresentaram valores de microdureza medidas próximas à superfície usinada bem próximos da sua microdureza média. A amostra 2 apresentou microdureza a 15 µm da superfície usinada de 114 HV, enquanto sua microdureza média é 113,2 HV. Já para a amostra 5, a microdureza a 15 µm da superfície usinada foi de 137 HV, enquanto sua microdureza média é 141,4 HV.

Por outro lado, as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) sofreram endurecimento próximo à superfície usinada. Para a amostra 3, a microdureza a 15 µm da superfície usinada (149 HV) foi cerca de 20% maior que a microdureza média do material (124 HV). Já para a amostra 4, a microdureza a 15 µm da superfície usinada (141 HV) foi cerca de 5% maior que a microdureza média do material (133,4 HV).

Os resultados confirmam a observação visual de que ocorreu a formação de uma zona afetada pelo corte, caracterizada pela alteração da microestrutura, e consequentemente da microdureza do material próximo à superfície usinada.

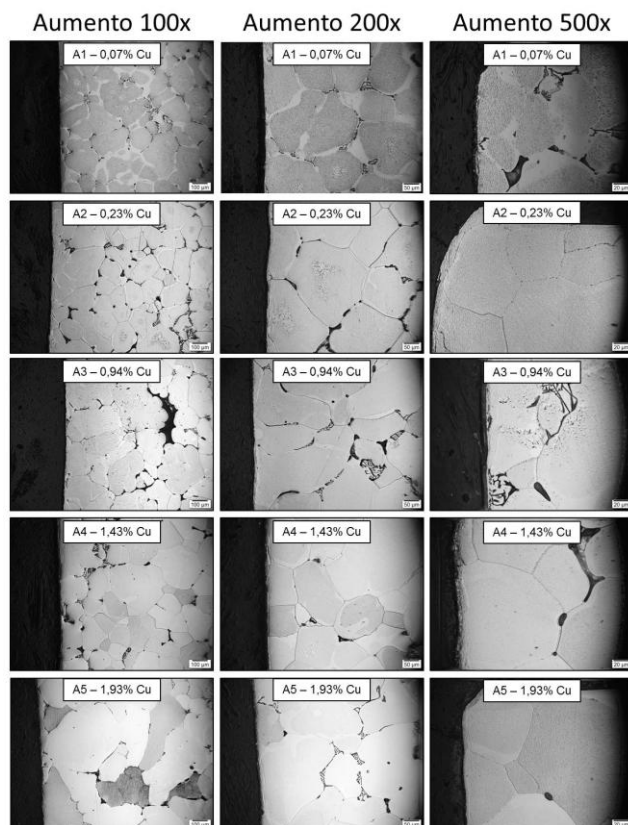


Figura 9. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x

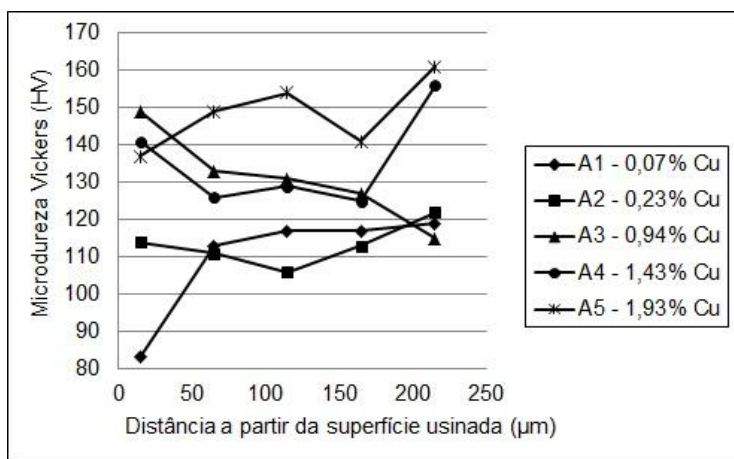


Figura 10. Microdureza Vickers em função da distância a partir da superfície usinada no processo de furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

4. CONCLUSÕES

A investigação acerca do efeito do teor de cobre durante os ensaios de furação da liga de alumínio 6351 desenvolvidos no presente trabalho levou a conclusões importantes.

A dureza média da liga de alumínio 6351 aumentou cerca de 16% com o aumento do teor de cobre de 0,07% Cu até 1,43% Cu. Para o maior nível de cobre utilizado (1,93% Cu) a dureza não seguiu a tendência de aumento. Além disso, o aumento no teor de cobre (de 0,07% Cu para 1,93% Cu) adicionado à liga de alumínio 6351 resultou no aumento do limite de resistência à tração em cerca de 7%. Por outro lado, este aumento na quantidade de cobre resultou em decréscimo no alongamento da liga de alumínio em cerca de 20%.

Os cavacos formados se apresentaram predominantemente na forma de leque, forma considerada ideal para o processo de furação. A amostra 2 (0,23% Cu) apresentou o maior valor de número de cavacos por grama obtidos na furação, evidenciando que os cavacos na usinagem desta amostra se quebraram mais facilmente.

A altura da rebarba de entrada obtida no processo de furação sofreu decréscimo, de cerca de 50%, à medida que se aumentou a quantidade de cobre (de 0,07% Cu para 1,93% Cu) adicionada à liga de alumínio 6351. Já a rebarba de saída diminuiu em cerca de 30% com esse mesmo aumento do teor de cobre. As rebarbas de entrada formadas podem ser classificadas como do tipo rebarba uniforme, enquanto as rebarbas de saída do tipo transiente.

Por fim, a partir da análise microestrutural e dos ensaios de microdureza foi verificada a presença de uma zona afetada pelo corte próxima à superfície usinada durante a furação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), o Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e o Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM).

6. REFERÊNCIAS

- AURICH, J. C.; DORNFELD, D.; ARRAZOLA, P. J.; FRANKE, V.; LEITZ, L.; MIN, S. Burrs - Analysis, Control and Removal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 519–542, 2009.
- BATZER, S. . A.; HAAN, D. . M.; RAO, P. . D.; OLSON, W. . W.; SUTHERLAND, J. . W. Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, n. 1–3, p. 72–78, 1998.
- GILLESPIE, L. K. **Deburring and edge finishing handbook**. Dearborn Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1999.
- IBRAHIM, M. F.; SAMUEL, E.; SAMUEL, a. M.; AL-AHMARI, a. M. a; SAMUEL, F. H. Impact toughness and fractography of Al-Si-Cu-Mg base alloys. **Materials and Design**, v. 32, n. 7, p. 3900–3910, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.058>>.
- KIM, J.; MIN, S.; DORNFELD, D. a. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 7, p. 923–936, 2001.
- LU, T.; WU, J.; PAN, Y.; TAO, S.; CHEN, Y. 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. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838815001802>>.
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- SANDVIK. **Suplemento dos Catálogos de Ferramentas para Torneamento e Rotativas 12.2**, 2012. .
- 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.; SUN, Q.; FENG, L.; HUI, L.; JING, C. Influence of Cu content on ageing behavior of AlSiMgCu cast alloys. **Materials and Design**, v. 28, n. 3, p. 1001–1005, 2007.
- YANG, Y.; LI, Y.; WU, W.; ZHAO, D.; LIU, X. Effect of existing form of alloying elements on the microhardness of Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 18, p. 5723–5728, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.022>>.
- YIN, D.; XIAO, Q.; CHEN, Y.; LIU, H.; YI, D.; WANG, B.; PAN, S. Effect of natural ageing and pre-straining on the hardening behaviour and microstructural response during arti fi cial ageing of an Al – Mg – Si – Cu alloy. **Journal of Materials and Design**, v. 95, p. 329–339, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.119>>.
- 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. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CHIPS AND BURRS FORMATION AND SUBSURFACE MODIFICATIONS ON DRILLING OF 6351 ALUMINUM ALLOY WITH DIFFERENT COPPER ADDITION

Gonçalves, Ricardo Augusto, ricardo.augusto@ict.ufvjm.edu.br¹

Da Silva, Márcio Bacci, mbacci@mecanica.ufu.br²

Costa, Éder Silva, eder@mecanica.ufu.br²

¹Federal University of Valleys of Jequitinhonha and Mucuri, Campus JK, Highway MGT 367, km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, Zip Code: 39100-000

²Federal University of Uberlândia, Boulevard João Naves de Ávila nº 2121, Campus Santa Mônica, Uberlândia/MG, Zip Code: 38408-100

Resumo: This work aims to investigate the influence of copper addition on chips and burrs formation, and subsurface modifications on drilling process. Five samples of 6351 aluminum alloy with different copper content (0.07%, 0.23%, 0.94%, 1.43% and 1.93%) and T6 temper (solubilized and artificially aged) specially manufactured by Brazilian Aluminum Company (CBA) for this work (are not commercial alloys). The mechanical properties of the samples were evaluated by hardness, microhardness, tensile and impact tests. Furthermore, it was carried out analysis of optical and scanning electron microscope equipped with energy dispersed X-ray. The cutting tool was an uncoated carbide drill and the cutting speed and feed rate was, respectively, 50 m/min and 0.25 mm/rev. The chips were evaluated by its size and morphology from visual analysis and number of chips per gram parameter. The parameter maximum height of burrs was measured on entry and exit of holes. And the subsurface modifications analysis was performed by microstructural analysis and microhardness. The results showed that the copper addition of 0.23% improve the chips breakability. On the other hand, the increase in copper content from 0.07% up to 1.93% caused the decrease in maximum burrs height of 50% on entry burrs and 30% on exit burrs. Also was verified the presence of a cutting affected zone near to the machined surface.

Palavras-chave: chips, burrs, 6351 aluminum alloys, subsurface modificacions, copper

COPYRIGHT

Authors are only responsible for the content of the printed material included in their work.