

ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351 NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO

William Alves da Cruz¹, williamacruz@hotmail.com

Jean Carlo Cescon Pereira¹, cescon@unifei.edu.br

Victor Carvalho de Almeida¹, victorca125@gmail.com

¹Universidade Federal de Itajubá, Rua Irmã Ivone Drummond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira-MG, 35903-087

Resumo: No presente trabalho foi analisado o comportamento da liga de alumínio AA6351 após a operação de torneamento. Foram realizados ensaios de torneamento onde foram variados os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem entre dois níveis para avaliar sua influência sobre a integridade superficial e subsuperficial dos corpos de prova. Após os ensaios de torneamento foram medidas a rugosidade, a dureza superficial, traçado o perfil de microdureza e realizada a análise metalográfica. Os resultados mostraram que o processo de torneamento influenciou a microestrutura do material, bem como sua rugosidade. A análise estatística mostrou que, dentro de um intervalo de confiança de 95%, o avanço foi o parâmetro de maior influência sobre a rugosidade média (R_a), seguido pela profundidade de usinagem. Para a rugosidade total (R_t) apenas o avanço foi considerado significativo dentro do intervalo de confiança de 95%. A análise metalográfica, revelou que o aumento dos parâmetros de usinagem provocou maior deformação nos grãos do material nas camadas mais próximas à superfície usinada. A medição do perfil de microdureza revelou que a amostra torneada com os parâmetros de corte nas condições máximas, apresentou maiores valores de microdureza ao longo do perfil medido em relação à amostra torneada com os parâmetros de corte nas condições mínimas. A medição da dureza superficial também apresentou valores mais elevados para a amostra torneada com os parâmetros de corte em sua condição máxima.

Palavras-chave: torneamento, parâmetros de corte, liga de alumínio AA6351.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Ferraresi (1977), dentre os processos de usinagem, o torneamento ocupa um lugar de destaque na indústria metalúrgica, pois possibilita dar forma a uma peça nas mais variadas geometrias. Na execução do torneamento devem ser levados em conta os parâmetros de usinagem, o material da peça, sua geometria e o material da ferramenta.

Dentre os parâmetros de torneamento, os fatores que atuam com maior intensidade na geração de alterações superficiais e subsuperficiais no material usinado, são, segundo Ferraresi (1977), Chiaverini (1986), Diniz, Marcondes e Coppini (2000): a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. De acordo com Colpaerte (2008) e ABAL (2007), existem diversos tipos de materiais utilizados na usinagem, dentre eles as ligas de alumínio, que nos dias de hoje se apresentam em enorme quantidade na indústria devido ao seu peso estrutural, resistência à corrosão e baixa densidade. A liga de alumínio AA6351 é um material dúctil, sendo chamado no meio industrial de material de fácil usinabilidade, termo que, segundo Amorim (2002) é o grau de dificuldade que a usinagem enfrenta devido às características e propriedades mecânicas do material.

A questão de conferir um bom acabamento superficial é aplicada às peças produzidas com a finalidade de promover um contato deslizante com outras peças numa montagem, de modo que o atrito entre os componentes seja o menor possível (Costa, 2010). As demais características de um produto, tais como: microdureza, microestrutura, acabamento e dureza superficial, dependem segundo Rech (2003), dos parâmetros de usinagem e do tipo de material usinado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram preparados 10 corpos de prova com diâmetro de 24 mm e comprimento de 100 mm. Cada corpo de prova foi dividido em duas sessões de 50 mm de comprimento, sendo que cada sessão foi torneada com diferentes combinações de parâmetros de corte, definidas segundo um projeto de experimentos. Os parâmetros: velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem foram variados em dois níveis, além de suas condições intermediárias, conforme mostrado na Tab. 1. O projeto de experimentos gerou oito combinações de parâmetros, com suas respectivas réplicas e quatro *center points*, conforme mostrado na Tab.2, sendo os ensaios de torneamento realizados

em ordem aleatória. As medidas da rugosidade foram realizadas com um rugosímetro Mitutoyo, modelo Sj-310, sendo analisados os parâmetros de rugosidade média R_a e rugosidade total R_t . Foram tomadas três medidas de rugosidade para cada uma das condições ensaiadas e calculada a média aritmética simples.

Na etapa de análise metalográfica foi realizado um corte transversal nos corpos de prova para retirada das amostras, as quais após passarem pelo processo de preparação foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan, modelo Vega 3, para verificar a influência dos parâmetros de corte da operação de torneamento sobre a microestrutura do material.

Tabela 1. Parâmetros de corte utilizados no processo de torneamento.

Parâmetros	V_c (m/mm)	f (mm/V)	a_p (mm)
Condição mínima	60	0,08	0,5
Condição intermediária	80	0,14	0,75
Condição máxima	100	0,2	1

A medição do perfil de microdureza foi realizada num microdurômetro Wilson Instruments, modelo 402 MVD nas amostras preparadas para a análise metalográfica. A primeira medição de microdureza foi realizada 50 microns abaixo da superfície usinada, e as medições subsequentes realizadas com incremento de 50 μm afastando-se da superfície em direção ao centro da peça. A carga utilizada nas medições foi de 100 gf, durante 60s. As medições de dureza superficial foram realizadas em um durômetro Laryee, modelo HBS – 3000, sendo realizadas três medições em cada corpo de prova e calculada a média aritmética.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Rugosidade

Na Tabela 2 são mostrados os valores medidos nos ensaios para as rugosidades R_a e R_t da liga AA6351.

Tabela 2. Valores médios de rugosidade para as amostras da liga de alumínio AA6351.

Número do ensaio	V_c (m/min)	f (mm/V)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)
1	60	0,08	0,5	0,64	3,80
2	100	0,08	0,5	0,81	4,93
3	60	0,2	0,5	2,81	12,47
4	100	0,2	0,5	2,61	11,27
5	60	0,08	1	0,91	4,57
6	100	0,08	1	1,06	5,93
7	60	0,2	1	2,69	11,87
8	100	0,2	1	2,93	12,53
9	60	0,08	0,5	0,79	4,67
10	100	0,08	0,5	0,69	3,93
11	60	0,2	0,5	2,74	12,67
12	100	0,2	0,5	2,66	12,20
13	60	0,08	1	1,00	5,47
14	100	0,08	1	0,87	5,13
15	60	0,2	1	2,77	11,50
16	100	0,2	1	2,82	12,40
17	80	0,14	0,75	1,53	7,87
18	80	0,14	0,75	1,22	6,50
19	80	0,14	0,75	1,69	9,20
20	80	0,14	0,75	1,35	7,13

Com o auxílio do software MiniTab foi gerado um projeto de experimentos contendo oito combinações dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem, variando entre dois níveis, suas respectivas réplicas e quatro *center points*, que representam os pontos médios dos parâmetros ensaiados.

A análise estatística mostrou que para a rugosidade média (R_a) o avanço foi o parâmetro de maior influência, seguido pela profundidade de usinagem, sendo que para a rugosidade total (R_t) apenas o avanço foi considerado significativo dentro do intervalo de confiança de 95%. Na Fig. 1 é apresentado o Gráfico de Pareto para efeitos padronizados sobre a rugosidade média (R_a) das amostras de alumínio. Pode-se perceber que o parâmetro de usinagem que mais exerce influência sobre a rugosidade média é o avanço (f) representado pela letra B, seguido da profundidade de corte (a_p), representado pela letra C, a qual exerce uma influência pouco significativa.

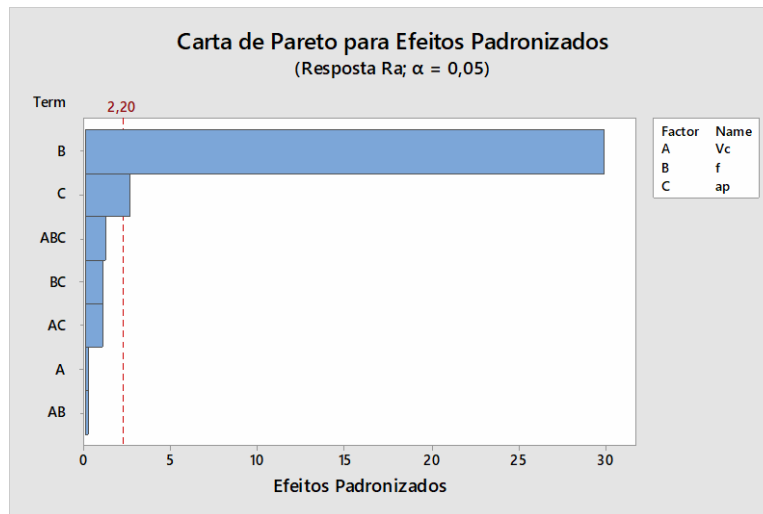


Figura 1. Gráfico de Pareto para efeitos padronizados sobre a resposta R_a .

Na Figura 2 é mostrado o gráfico dos efeitos principais sobre a Rugosidade R_a nas amostras de alumínio. Pode-se notar que os valores mais baixos de R_a são obtidos para as menores velocidades de avanço, e os valores mais altos de R_a são encontrados quando é utilizada a maior velocidade de avanço. Pode-se perceber que a velocidade de corte (V_c) praticamente não exerce influência sobre R_a , e a profundidade de usinagem (a_p) exerce pouca influência.

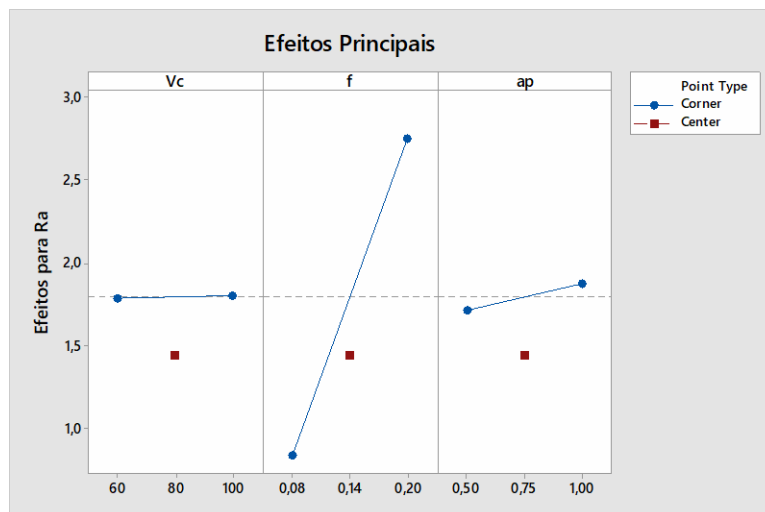


Figura 2. Gráfico de efeitos principais sobre a resposta R_a .

Os resultados para a rugosidade total (R_t) são semelhantes aos resultados obtidos para a rugosidade média (R_a), com a diferença que o único parâmetro a exercer influência significativa sobre a rugosidade total dentro de um intervalo de confiança de 95% foi o avanço (f).

3.2. Análise Metalográfica

Com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram analisados os contornos de grãos e consequentemente a influência do torneamento sobre a microestrutura das amostras. Na Fig. 3 são mostrados os contornos de grãos da amostra torneada com todos os parâmetros de corte nos valores mínimos: $V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V; $a_p = 0,5$ mm. A região marcada como zona 1 está localizada próxima à superfície torneada da amostra e a zona 2 representa uma região mais afastada da superfície. Na Fig.4 é mostrada a zona 1 com ampliação maior para permitir melhor visualização dos contornos de grão do material.

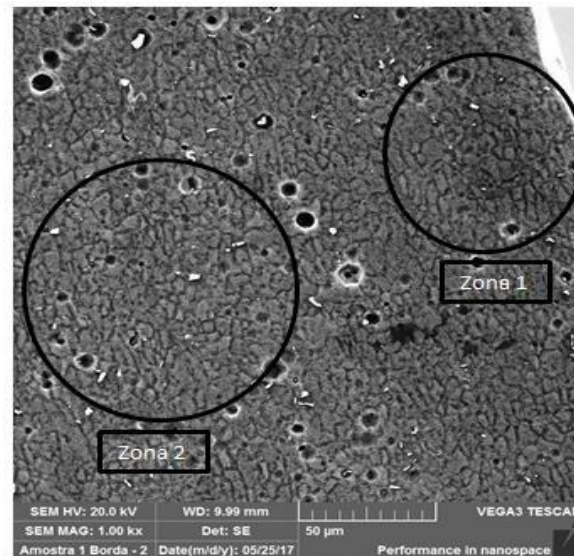


Figura 3. Contornos de grãos da amostra torneada com: $V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V e $a_p = 0,5$ mm; aumento de 1000x.

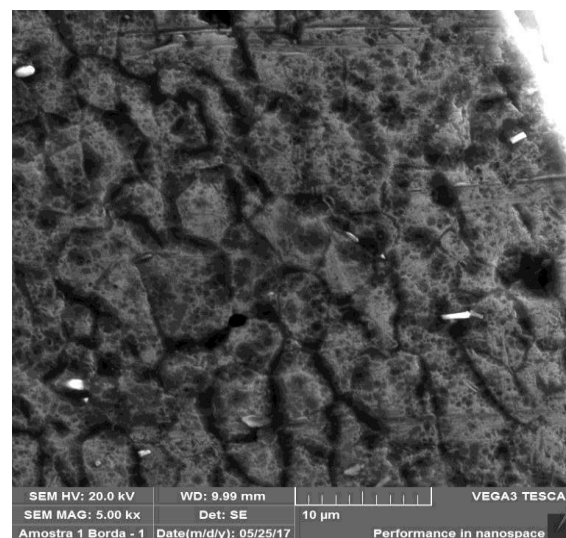


Figura 4. Detalhamento da zona 1 da amostra torneada com: $V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V e $a_p = 0,5$ mm; aumento de 5000x.

Percebe-se que na zona 1 os contornos de grãos das camadas mais próximas à superfície usinada estão mais afinados ou conformados, provavelmente devido à ação mecânica da ferramenta de corte. Alguns deles se encontram cisalhados devido a ação cortante da ferramenta. Na zona 2 os grãos do material encontram-se menos conformados que na zona 1. Em decorrência da ação mecânica da ferramenta de corte, as camadas próximas à superfície da peça sofrem maior deformação.

São mostrados na Fig. 5 os contornos de grãos da amostra torneada com os parâmetros de corte nos valores máximos: $V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm e indicadas a zona 1, que se encontra próxima à superfície torneada e a zona 2, mais afastada da superfície de uma amostra de alumínio da liga AA6351.

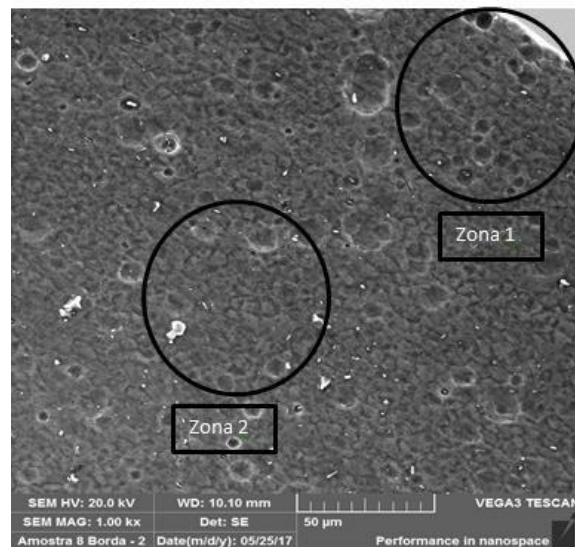


Figura 5. Contorno de grãos da amostra torneada com: $V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V e $a_p = 1$ mm; aumento de 1000x.

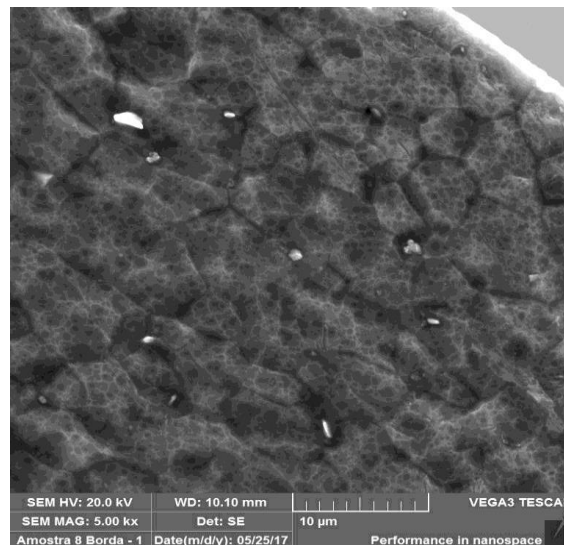


Figura 6. Detalhamento da zona 1 da amostra torneada com: $V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V e $a_p = 1$ mm; aumento de 5000x.

Analisando-se as zonas 1 e 2 mostradas na Fig. 5 nota-se que a zona 1 tem seus grãos mais conformados que os grãos da zona 2, encontrando-se alguns deles cisalhados, semelhante ao verificado para a amostra torneada com as condições mais brandas de usinagem (Fig. 3). Observando-se a Fig. 6, onde os parâmetros de usinagem estavam todos em seu nível mais alto ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V e $a_p = 1$ mm), nota-se maior compactação dos grãos do material comparativamente aos grãos mostrados na Fig. 4 ($V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V e $a_p = 0,5$ mm). Isto se deve provavelmente às condições de corte mais severas utilizadas na operação de torneamento da amostra exibida na Fig. 6.

3.3. Perfil de Microdureza

A Tabela 3 e a Tabela 4 representam os perfis de microdureza das amostras torneadas com as condições no nível mais baixo: $V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V; $a_p = 0,5$ mm e com as condições no nível mais alto: $V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm, respectivamente. As medições foram realizadas iniciando-se da região próxima à borda da amostra cortada transversalmente da peça e seguiram-se com sentido ao centro, com espaçamento de 50 μ m entre elas, sendo que a primeira medida foi realizada 50 μ m abaixo da superfície torneada.

Analisando a Tab. 3, percebe-se que os valores médios da microdureza medidos de 50 μ m até 250 μ m, são maiores que as medias de 450 μ m até 650 μ m, isso representa que o torneamento teve influência sobre a microdureza do material.

É mostrado na Figura 7 o comportamento do perfil de microdureza da liga AA6351, de acordo com os dados coletados da Tab.3 e utilizando-se os valores da média calculada.

Tabela 3. Valores de microdureza da amostra torneada com as condições: $V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V e $a_p = 0,5$ mm.

Distancia	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Média
50 μ m	118,5	119,2	117,5	117,73
100 μ m	116,4	115,5	113,8	115,23
150 μ m	115,2	114,4	115,9	115,16
200 μ m	115,5	113,7	112,1	113,76
250 μ m	114,9	113,5	116,5	114,96
450 μ m	109,8	110,8	110,4	110,33
500 μ m	110,5	109,3	108,5	109,43
550 μ m	108,5	107,9	107,6	107,99
600 μ m	105,4	106,4	106,8	106,20
650 μ m	105,6	108,6	109,5	107,90

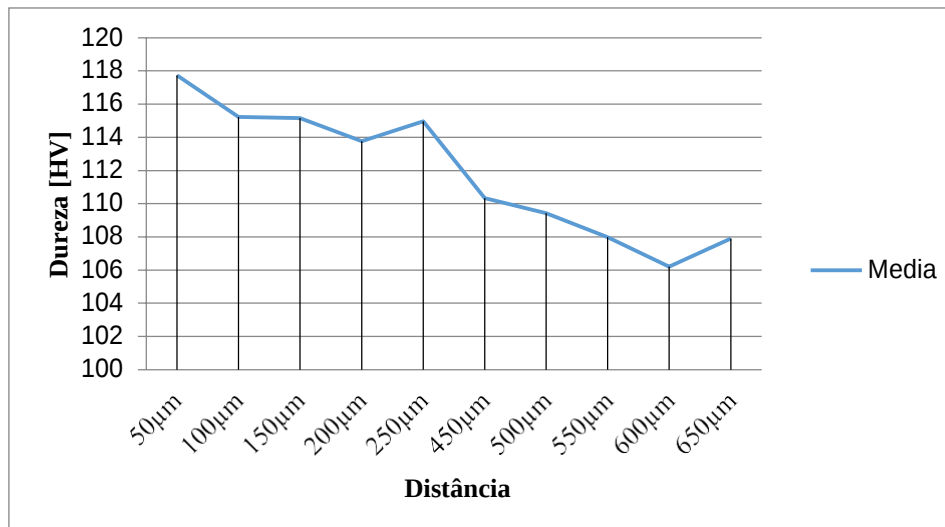


Figura 7. Perfil de microdureza ($V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V e $a_p = 0,5$ mm).

Na Tabela 4 é mostrado o perfil de microdureza da amostra da liga de alumínio AA6351 torneada com as condições mais severas de corte ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm). Observando-se os valores das médias das medidas, nota-se que o valor da microdureza diminui quando se parte da região mais próxima à superfície da amostra e caminha-se em sentido ao centro, de maneira semelhante ao verificado para a amostra torneada com as condições mais brandas. Na Fig. 8 é mostrado o gráfico do perfil de microdureza da amostra torneada com as condições mais severas ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm). Nota-se que até a profundidade de 250 μ m os valores de microdureza decrescem pouco, mantendo-se acima dos 120 Vickers. A medição de microdureza corrobora os resultados das análises metalográficas, mostrando com maior clareza que a amostra torneada com as condições mais severas sofreu maior encruamento do material relativamente à amostra torneada com as condições mais brandas. Apesar de a profundidade da camada afetada pela ação da ferramenta de corte ser semelhante nos dois casos, a amostra torneada com as condições mais severas apresentou maiores valores de microdureza (entre 120 e 125 HV) que a amostra torneada com condições mais brandas (114 a 117 HV).

Tabela 4. Valores de microdureza da amostra torneada com as condições: $V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm.

Distância	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Média
50µm	122,5	125,2	120,5	122,73
100µm	126,4	125,5	123,8	125,23
150µm	123,5	124,7	122,1	123,43
200µm	122,5	122,7	126,1	123,76
250µm	118,9	118,5	123,5	120,31
450µm	112,8	112,5	110,8	112,03
500µm	110,5	109,3	105,5	108,43
550µm	108,5	106,9	107,6	107,66
600µm	105,4	106,4	106,8	108,20
650µm	108,6	108,6	105,5	107,56

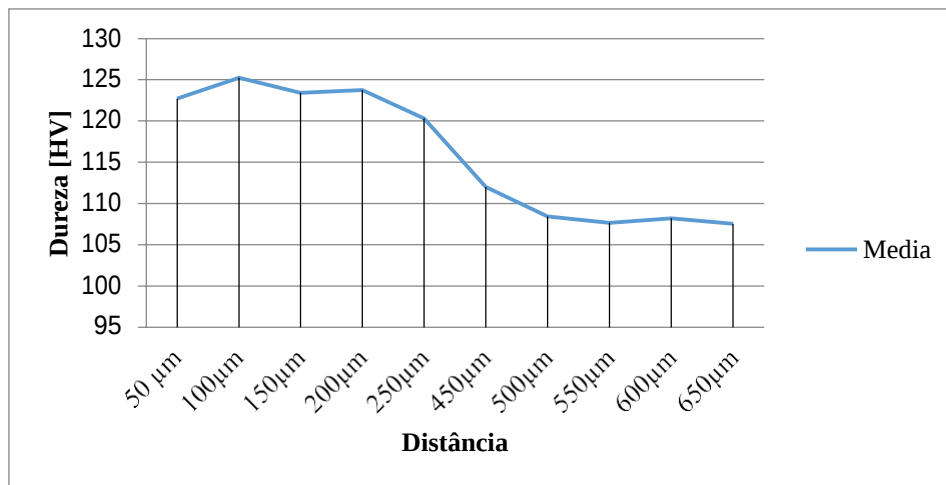


Figura 8. Perfil de microdureza ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm).

3.4. Dureza da superfície

Para a medição da dureza superficial foram escolhidas cinco combinações de parâmetros de torneamento: todos os parâmetros no nível mínimo ($V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V; $a_p = 0,5$ mm), todos os parâmetros no nível máximo ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 1$ mm) e as condições intermediárias ($V_c = 100$ m/min; $f = 0,08$ mm/V; $a_p = 0,5$ mm), ($V_c = 60$ m/min; $f = 0,20$ mm/V; $a_p = 0,5$ mm), ($V_c = 60$ m/min; $f = 0,08$ mm/V; $a_p = 1$ mm), conforme mostrado na Tab. 5. Foram realizadas três medições para o valor de dureza para cada uma das cinco condições escolhidas e calculada a média aritmética.

Os valores encontrados estão de acordo com o esperado, ou seja, a amostra torneada com as condições mais brandas apresentou o menor valor médio de dureza superficial e a amostra torneada com as condições mais severas apresentou o maior valor médio de dureza. Dentre as amostras torneadas com as condições intermediárias de corte, houve pouca variação entre as médias de dureza; entretanto, dentre estas amostras, a que apresentou maior valor individual de dureza foi a amostra torneada apenas com a velocidade de corte no nível mais alto.

Tabela 5. Valores de dureza Brinell.

Amostra	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza Media
Vc = 60 m/min; f = 0,08 mm/V; ap = 0,5 mm	94.0	89.3	95.73	93,03
Vc = 100 m/min; f = 0,08 mm/V; ap = 0,5 mm	101,3	89.8	100.1	97,06
Vc = 60 m/min; f = 0,20 mm/V; ap = 0,5 mm	97.4	99.6	98.9	98,63
Vc = 60 m/min; f = 0,08 mm/V; ap = 1 mm	94.0	102.1	95.3	97.13
Vc = 100 m/min; f = 0,20 mm/V; ap = 1 mm	97.6	99.9	99.6	99,05

4. CONCLUSÃO

De acordo com o projeto de experimentos utilizado, verificou-se que os parâmetros de corte que proporcionaram maior influência sobre a rugosidade média (R_a) foram o avanço e a profundidade de usinagem, sendo que esta apresentou influência bastante discreta, porém dentro do intervalo de significância de 95%. Ambos os parâmetros proporcionam maior valor de rugosidade média quando utilizados em seu nível mais alto. Para a rugosidade total (R_t), apenas o avanço apresentou influência significativa, sendo que quando utilizado em seu nível mais elevado proporcionou maiores valores de rugosidade.

A análise metalográfica permitiu verificar que os grãos do material localizados nas camadas subsuperficiais mais próximas à superfície torneada, sofreram maior deformação que os grãos localizados nas camadas mais profundas.

Também foi possível verificar que os grãos de material da amostra torneada com as condições mais severas de usinagem encontraram-se mais compactados que os grãos da amostra torneada com as condições de corte mais brandas.

O resultado da medição de microdureza é complementar ao resultado da análise metalográfica. Os valores de microdureza encontrados nas camadas subsuperficiais localizadas próximas à superfície torneada das amostras são maiores que os valores encontrados nas camadas mais distantes da superfície. Também foi observado que para o torneamento realizado com todos os parâmetros de corte no nível mais alto, os valores de microdureza foram superiores aos encontrados para o torneamento realizado com todos os parâmetros no nível mais baixo, embora a profundidade da camada afetada tenha sido a mesma para ambas as situações.

Os valores de dureza da superfície das amostras também indicam influência dos parâmetros de corte sobre esta característica. O corpo de prova da liga de alumínio AA6351 torneada com as condições mais brandas apresentou o menor valor médio de dureza, enquanto que o corpo de prova torneado com as condições mais severas apresentou maior média de dureza.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos de laboratório Rogério Felipe da Costa e Jordânio Samuel Siqueira (Unidade Acadêmica de Engenharia da UNIFEI) pelo apoio na preparação das amostras.

Os autores também agradecem à FAPEMIG pelo apoio à realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Amorim, H. J., 2002, “Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro”. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., 2012, “Teoria da usinagem dos materiais”, São Paulo: Blucher.
- Mkaddem, A.; Bahloul, R.; Santo, P. D.; Potiron, A., 2006, “Experimental characterization in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique”. Journal of Materials Processing Technology, 180, pg 1-8.
- Chiaverini, V., 1986, Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades Processos de Fabricação. São Paulo: Ed. MacGraw-Hill do Brasil, LTDA., vol. 1, cap. 11, p. 369-374.
- Colpaerte, H., 2008, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”. Ed. Blucher, 4 ed Revisada e atualizada por: Silva, A. L. V. C.
- Comissão Técnica da ABAL, 2007, Fundamentos e Aplicações do Alumínio. 2ed.
- Costa, J. D. D., 2010, “Análise de Rugosidade em Superfícies Usinadas de Forma Complexa”. São José dos Campos, SP.
- Diniz, A.D.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L., 2000, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. 2.ed. São Paulo: Artliber editora, 224 p.

- Ferraresi, D., 1977, “Usinagem dos Metais: Fundamentos da Usinagem dos Metais”. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., v.1, 752 p.
- Rech, J. and Moisan, A., 2003, “Surface Integrity in Finish Hard Turning of Case-hardened Steels”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 5, pp. 543-550.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SURFACE AND SUBSURFACE INTEGRITY ANALYSIS OF THE AA6351 ALUMINUM ALLOY IN TURNING OPERATION

William Alves da Cruz¹, williamacruz@hotmail.com

Jean Carlo Cescon Pereira¹, cescon@unifei.edu.br

Victor Carvalho de Almeida¹, victorca125@gmail.com

¹Universidade Federal de Itajubá, Rua Irmã Ivone Drummond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira-MG, 35903-087

Abstract. *In the present work the behavior of the AA6351 aluminum alloy after the turning operation was analyzed. Turning tests were performed in which the parameters cutting speed, feed rate and machining depth were varied between two levels to evaluate their influence on the surface integrity of the specimens. After the turning tests, roughness, surface hardness, microhardness tracing and metallographic analysis were performed. The results showed that the turning process influenced the microstructure of the material as well as its roughness. The statistical analysis showed that, within a 95% confidence interval, the feed rate was the parameter of greatest influence on the average roughness (R_a), followed by the machining depth. For the total roughness (R_t) only the feed rate was considered significant within the 95% confidence interval. The metallographic analysis revealed that the increased machining parameters caused a greater deformation in the grains of the material in the layers closer to the machined surface. The microhardness profile showed that the specimen turned with the cutting parameters under the maximum conditions presented higher values along the profile measured in relation to the specimen turned with the cutting parameters in the minimum conditions.*

Keywords: turning, cutting parameters, aluminum alloy AA6351.