

Estudo da topografia superficial no fresamento da liga de alumínio 6351 T6**Study of surface topography in milling of 6351 T6 aluminum alloy**

Article Info:

Article history: Received 2020-01-07 / Accepted 2022-03-01 / Available online 2022-03-18

doi: 10.18540/jcecv18iss3pp14027-01e

Eliene Oliveira LucasORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-229X>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: eliene.lucas@ufv.br**Rafael Borges Mundin**

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: mundim89@gmail.com**Eder Silva Costa**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

E-mail: edercosta@ufu.br**Antônio Marcos de Oliveira Siqueira**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7088-3211>

Federal University of Viçosa, Brazil

E-mail: antonio.siqueira@ufv.br**Resumo**

No fresamento a textura superficial é gerada pela superposição de superfícies onduladas resultantes da passagem de um gume é removida pelo subsequente que também deixa uma ondulação. A diferença de fase entre as ondulações é empregada como indicativo da presença de vibrações que resultam principalmente num pior acabamento superficial. Os desvios geométricos superficiais (rugosidade e ondulação) representam uma medida relativa da estabilidade do processo. O objetivo deste trabalho é descrever a topografia superficial, a partir de ensaios sistemáticos de fresamento de topo da liga de alumínio 6351 T6 com emprego de fresas de topo metal duro integrais. Os resultados são apresentados com base nos parâmetros verticais de rugosidade (Ra, Rq, Rz e Rt), curtose e profundidade de ondulação para condições de velocidades de corte e avanços variados.

Palavras-chave: Topografia superficial, Acabamento pós- processual, Fresamento de liga de alumínio.

Abstract

In milling the surface texture is generated by the superposition of curved surfaces resulting from the passage of an edge is removed by the subsequent which in turn makes a waviness. The phase difference between the waves is used as indicative of the presence of vibrations that mainly result in a poor surface finish. Topography parameters (roughness and waviness) represent a relative measure of the process stability. This study's objective is to describe the surface topography, from systematic trials in milling of aluminum alloy 6351T6 with solid carbide end mills different only with respect to surface finish. The results were based on acquired vertical roughness parameters (Ra, Rq, Rz, and Rt) to different cutting conditions.

Keywords: Topography surface; Post-coat treatment; Milling of aluminum alloy.

1. Introdução

A formação da rugosidade de processo é, em geral, regida por fenômenos que ocorrem no gume da ferramenta de corte, sendo eles relacionados ao comportamento do material usinado. As ligas de alumínio apresentam a tendência à formação do gume postiço devido à presença contínua de adesões na interface cavaco-ferramenta e, este fenômeno é observado em velocidades de corte de até 300 m/min. Segundo Trent; Wright (2000) estas adesões, em função do calor gerado, caldeiam na superfície recém-formada na peça, danificando o acabamento da peça.

Para Klocke; König (2000) o desgaste da ferramenta nestas ligas ocorre geralmente ocorre pelo deslocamento e perda de afiação do gume da ferramenta de corte. Com a perda da capacidade de corte ocorre aumento da força de corte, aumento da temperatura na raiz do cavaco. Com o aumento da temperatura o material é plastificado entre a peça e o flanco da ferramenta danificando a superfície acabada.

Dentre as estratégias empregadas para minimizar a formação de adesões na interface cavaco ferramenta destacam-se o emprego de fluidos de corte e o acabamento pós-processual de regiões específicas da ferramenta de corte. O polimento dos flancos primário e secundário e da face da ferramenta visa reduzir a adesão do cavaco sobre estas regiões favorecendo, desta forma, menor restrição ao livre escoamento cavaco sobre a face da ferramenta (Black, 2005).

Os desvios geométricos (rugosidade e ondulação) têm sido empregados como critério geral para o controle e a qualificação de superfícies. Alguns parâmetros verticais de rugosidade são significativos e mundialmente aceitos, a saber, a exemplo da rugosidade média aritmética. No entanto, é de consenso geral que um único parâmetro não é suficiente para caracterizar algo tão complexo como a textura superficial.

Vários trabalhos (Bet, 1999; Davim, 2010) mostram que a textura e a integridade superficial são consideravelmente influenciadas pelas características da ferramenta de corte, nomeadamente: a geometria, a forma, o material, o grau de acabamento das superfícies e o seu o comportamento de desgaste.

Este estudo visa avaliar o efeito do tratamento pós-processual de acabamento em fresas de metal duro integral sobre a textura superficial da liga de alumínio 6351 T6. A influência do grau de acabamento da fresa sobre o acabamento superficial da peça foi avaliada com base nos parâmetros verticais de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_y) medidos na direção do avanço. A medição da rugosidade do corpo de prova foi feita por apalramento mecânico (rugosímetro portátil) para diferentes combinações avanços por dente (f_z) e profundidades de corte (a_p). A condição de desgaste da ferramenta corte foi avaliada com base em imagens da ferramenta de corte em função do tempo de corte após a cada combinação de corte empregada.

Os ensaios de fresamento foram realizados num centro de usinagem Romi Discovery ® CNC, e empregado como material de peça a liga de alumínio 6351 T6. Os resultados apresentados são baseados em dados obtidos de rugosidade (R_a , R_q , R_z e R_y) para combinações de corte variadas.

2. Metodologia

Foram realizados ensaios de fresamento, com o emprego de fresas de topo cilíndricas retas, distinguidas pelo grau de acabamento e pelo ângulo de hélice, no acabamento da liga de alumínio 6351 T6. Os experimentos foram feitos de forma a avaliar o efeito do grau de acabamento da ferramenta de corte sobre a rugosidade da peça em função variação do avanço por dente (f_z) e da profundidade de corte (a_p). Tal avaliação foi feita com base nos parâmetros verticais de rugosidade.

Na medição dos parâmetros verticais de rugosidade foi empregado um rugosímetro portátil (Mitutoyo® modelo SJ – 201 P) com software de aquisição e tratamento dos dados. Foi empregado um comprimento de amostragem (Cutoff) de 0,25 mm com um filtro do tipo Gaussiano. Os parâmetros verticais foram escolhidos com base na capacidade de indicar propriedades da superfície, a saber: atrito, desgaste e lubrificação.

Os parâmetros verticais de rugosidade adotados foram: o desvio médio aritmético de rugosidade (R_a), o desvio médio quadrático (R_q), a altura máxima do perfil (R_t) e a profundidade média de rugosidade (R_z).

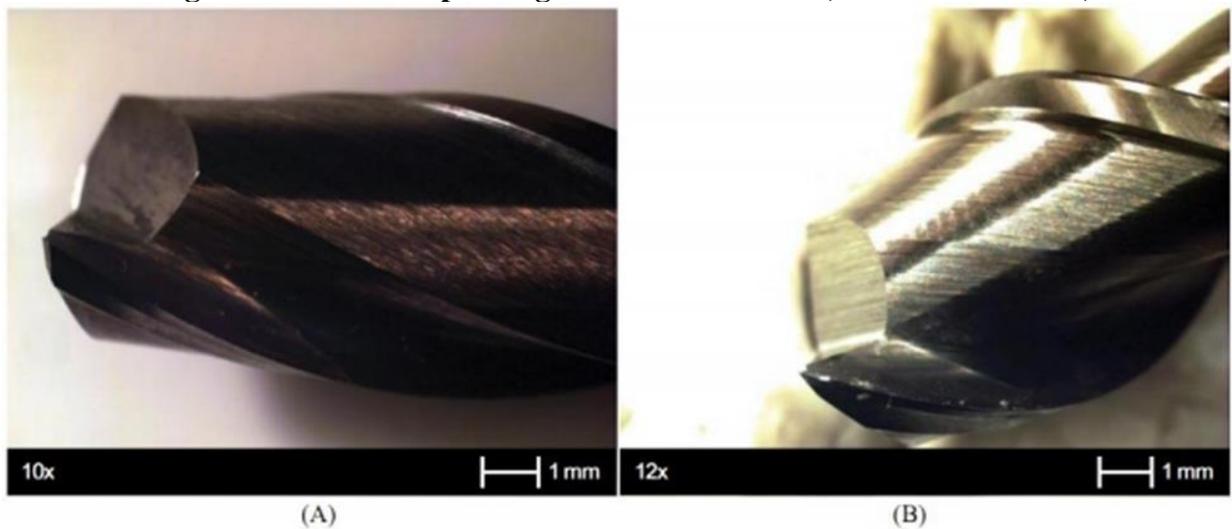
Foram feitas aberturas de canais de 162 mm de comprimento totalizando, para cada combinação de corte avaliada, um comprimento de corte de 2916 mm. Foram delimitadas 12 regiões de amostragem no corpo de prova e efetuada três medições para cada região na direção do avanço.

O corpo de prova, uma barra cilíndrica de alumínio 6351 T6 (forjada) com resistência a tração 310 MPa, foi previamente fresado e rebaixado nas duas laterais para facilitar a entrada e saída da ferramenta de corte. A fixação do corpo de prova foi feita de forma evitar instabilidades dinâmicas.

Os ensaios de fresamento foram realizados num centro de Usinagem Romi® (Discovery 760) provido de comando Siemens; velocidades até 10.000 rpm; motor principal 9 kW, potência total instalada 15 kVA.

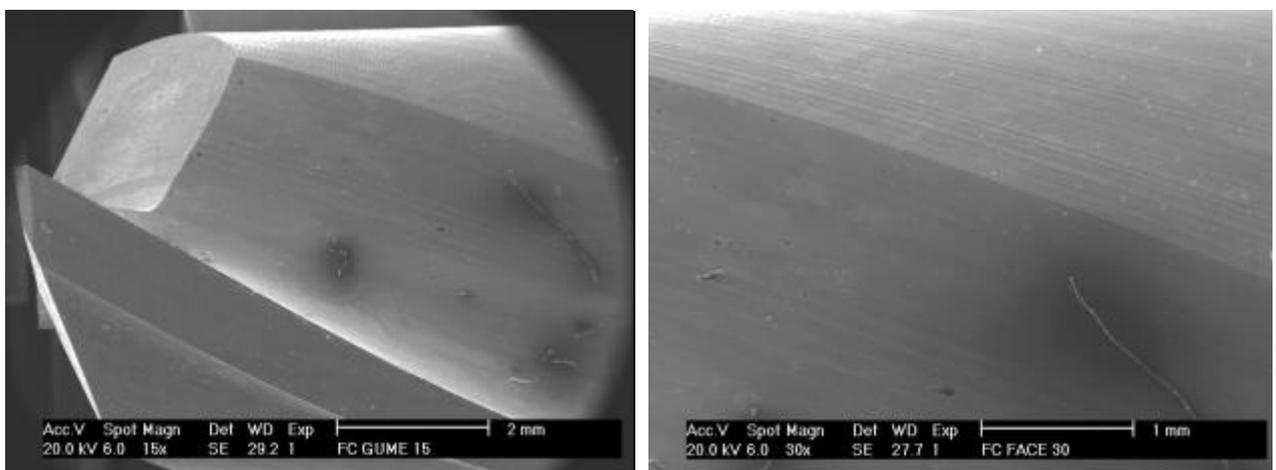
As ferramentas de corte empregadas foram fresas de topo cilíndricas retas, distintas pelo grau de acabamento e pelo ângulo de hélice (Figura 1).

Figura 1. Fresa de topo integral de metal duro. A) Sem Polimento B) Polida



Na Figura 2 são mostradas fotografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, das características da superfície da fresa polida.

Figura 2. Fotografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de regiões da fresa de topo polida



A geometria das fresas empregadas nos ensaios é apresentada na Tabela 1. As terminologias convencionadas para distinguir as fresas de topo foram: fresa “polida” e “sem polimento”.

Tabela 1. Geometria das fresas empregadas nos ensaios

Tipo de fresa	Diâmetro (mm)	Ângulo de hélice	Número de canais	Comprimento ativo do gume (mm)	Comprimento total (mm)
Polida	8	45	2	20	63
Sem	8	30	2	20	63

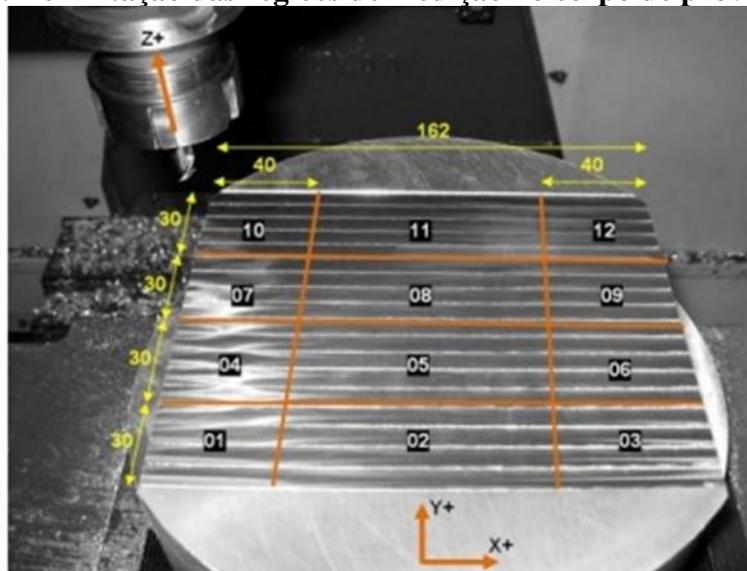
Os ensaios foram replicados três vezes para cada combinação de avanço (f_z) e profundidade de corte (a_p) avaliada. A profundidade radial de corte (a_e) e a velocidade de corte (v_c) foram mantidas constantes. Os parâmetros de corte empregados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de corte empregadas

Ensaio	Avanço por dente f_z (mm)	Velocidade de Corte v_c (m/min)	Rotação N (RPM)	Profundidade e de corte axial a_p (mm)	Profundidade e de corte radial a_e (mm)	Comprimento total usinado L (mm)	Velocidade da mesa v_f (mm/min)
1	0.	180	716	0.5	7	2916	473
2	0.	180	716	1	7	2916	473
3	0.	180	716	0.5	7	2916	802
4	0.	180	716	1	7	2916	802
5	0.	180	716	0.5	7	2916	802

No corpo de prova foram fresados canais de 162 mm de comprimento totalizando um comprimento de corte de 2916 mm para cada condição avaliada. Foram delimitadas 12 regiões de amostragem no corpo de prova (Figura 3) e efetuada três medições para cada região na direção do avanço.

Figura 3. Delimitação das regiões de medição no corpo de prova fresado

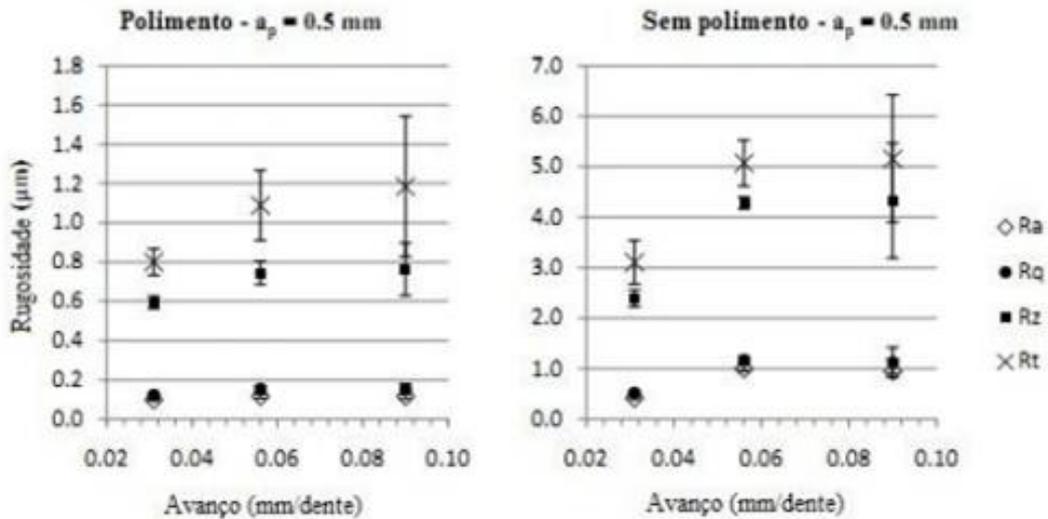


A avaliação da condição de desgaste da ferramenta foi feita após cada ensaio sendo utilizado um estéreo- microscópio (Olympus -SZ-61) na análise e aquisição de imagens das regiões desgastadas na ferramenta de corte.

3. Resultados e discussões

Na Figura 4 são apresentados os dados de rugosidade obtidos para as ferramentas com e sem polimento.

Figura 4. Valores de rugosidade para a ferramenta polida e sem polimento para a profundidade de corte de 0,5 mm e três diferentes avanços. Erro amostral para 12 amostras para um intervalo de confiança de 95%.



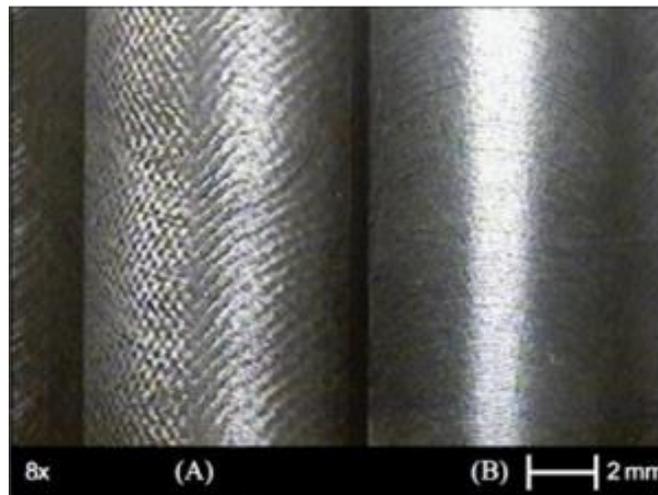
No fresamento com a fresa polida (Figura 4), para um aumento no avanço, de $fz = 0,031$ mm/dente para $fz = 0,056$ mm/dente, foi observado um pequeno aumento nas rugosidades Ra, Rq e um significativo aumento em Rz. Com o incremento do avanço, de $fz = 0,056$ mm/dente para $fz = 0,09$ mm/dente, não foram observadas variações significativas nos parâmetros de rugosidade. Para o avanço $fz = 0,056$ mm/dente observou-se uma grande dispersão nos resultados (Figura 4).

Os parâmetros de máximo Rt e Rz obtidos foram significativamente mais baixos para as ferramentas polidas quando comparados com os valores obtidos para as ferramentas sem polimento.

Os parâmetros de rugosidade Rz e Rt (Figura 4), obtidos para o avanço $fz = 0,056$ mm/dente e profundidade de corte de 0,5 mm (ferramenta polida) encontrados foram respectivamente $Rz = (0,75 \pm 0,06) \mu\text{m}$ e $Rt = (1,09 \pm 0,18) \mu\text{m}$.

Os parâmetros médios de rugosidade Ra e Rq apresentaram menores valores para as ferramentas polidas. No entanto, devido as ferramentas apresentarem ângulos de hélices distintos, o baixo valor não pode ser atribuído ao polimento pós-processual da ferramenta. Apesar destas diferenças as características da superfície geradas para condições de corte análogas podem ser claramente observadas (Figura 5). A superfície gerada pela ferramenta polida é mais lisa e mais regular quando comparada àquela obtida com o uso da ferramenta sem polimento.

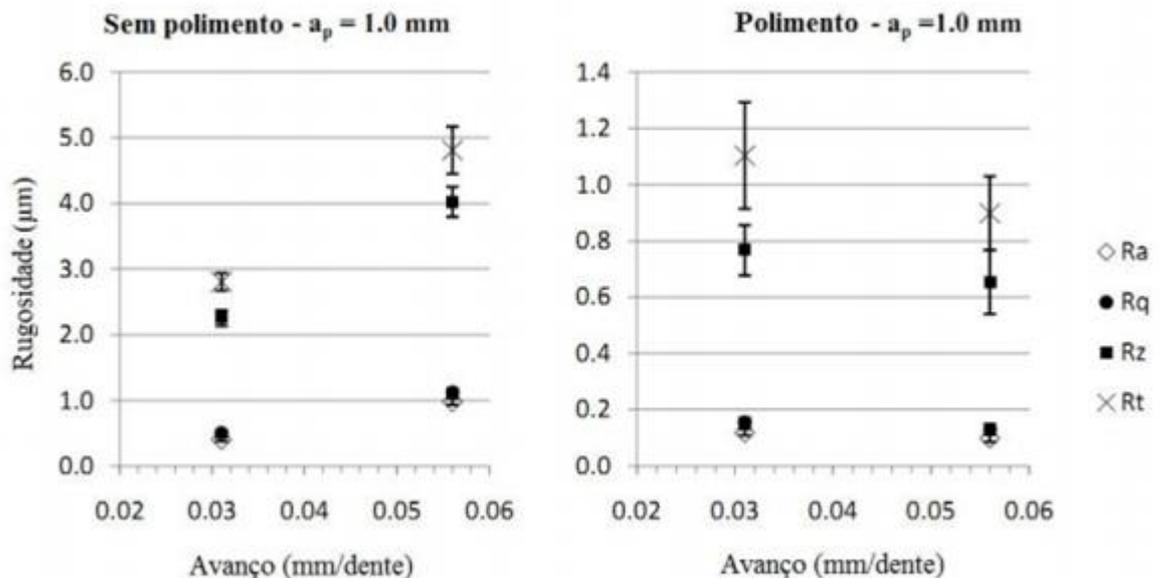
Figura 5. Características da superfície obtida com o emprego de fresa integral de metal sem polimento (A) e polida (B) Condições de corte: $f_z = 0,031$ mm/dente; $a_p = 0,5$ mm e $v_c = 180$ m/min.



Os parâmetros verticais R_t e R_z obtidos com o uso da ferramenta polida foram mais baixos que os valores obtidos com a ferramenta sem polimento para a profundidade axial de corte a $p = 1$ mm. Com o aumento do avanço, os valores de R_t e R_z aumentaram consideravelmente para a ferramenta sem polimento, por outro lado os valores de R_a e R_q não apresentaram variações significativas. O aumento na rugosidade foi atribuído ao desgaste da ferramenta de corte (Figura 6).

Uma pequena redução na rugosidade foi observada para a ferramenta polida para a profundidade de corte $a_p = 1$ mm quando o avanço foi aumentado. O aumento na rugosidade para baixos avanços é atribuído à redução da espessura crítica do cavaco, que por sua vez favorece a formação de um cavaco com fluxo instável que adere mais facilmente sobre o gume da ferramenta aumentando a rugosidade da superfície.

Figura 6. Dados de rugosidade para fresas polidas e sem polimento para a profundidade de corte a $p = 1$ mm e dois avanços. O erro padrão foi estimado para 12 amostras e intervalo de confiança de 95%.



Em baixas velocidades de corte (baixas temperaturas) e pequenos avanços ocorre a formação do gume postiço. Sua formação se deve a um processo cíclico de deposição e encruamento de partículas do material na interface cavaco- ferramenta. A afinidade química entre o par ferramenta-peça e a tensão compressiva contribuem para a formação do gume postiço.

A formação de adesões é um fenômeno que ocorre para toda condição de corte. A transição entre os regimes de deformação plástica (gume postiço ou zona de fluxo) onde a formação do gume é de pequena dominância não é claramente definida. Para Trent; Wright (2000) na usinagem de certos materiais, como por exemplos os aços, esta transição é notável para certas combinações de condições de corte. No torneamento das ligas de 2024 (alumínio-cobre) esta transição foi observada por List et al. (2005) em velocidades de corte acima de 120 m/min.

Na usinagem das ligas de alumínio o desgaste ocorre devido principalmente à presença de adesões na interface cavaco-ferramenta o que conseqüentemente afeta a qualidade da superfície usinada. Neste caso o efeito do tratamento pós-processual da superfície da ferramenta é mais evidente para baixas velocidades, onde a formação do gume postiço é dominante.

Com o aumento da velocidade de corte (aumento da temperatura) ocorre difusão de elementos da ferramenta para peça e vice-versa. Em velocidades de corte elevadas a presença de adesões na interface facilita o fluxo do cavaco; e caso a pressão de contato e as temperaturas favoreçam a formação de um filme uniforme e contínuo na interface, atua também como uma barreira contra a difusão.

Em ensaios recentes de torneamento de acabamento da liga de alumínio 6351 T6 na condição a seco, com ferramenta de metal duro polida, para a velocidade de corte de 600 m/min, avanço 0,5 mm e profundidade de corte de 1 mm, observou-se que a presença de adesões alteravam o fluxo lateral do cavaco projetando-o contra a peça, momentos após a estabilização do corte. Neste caso, o polimento da ferramenta facilitou o livre escoamento do cavaco sobre a face da ferramenta. Por outro lado, o cavaco sem restrição ao movimento muda o fluxo lateral logo após a estabilização do corte, e se projeta contra superfície recém-formada.

O comportamento de desgaste da fresa de metal duro sem revestimento foi atribuído aos mecanismos combinados de adesão e abrasão de partículas do material da peça. Foi observada a presença de adesões e de ranhuras típicas de abrasão nos flancos da fresa de metal duro sem revestimento (Figura 7).

Figura 7. Ranhuras típicas de abrasão observadas nas fresas de metal duro sem revestimento



4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos verificou-se que grau de acabamento da fresa de topo em metal duro integral influenciou a rugosidade superficial da liga de alumínio 6351 T6 para as condições de corte observadas. Para a profundidade de corte radial $ap = 0.5$ mm o efeito do aumento do avanço (fz) sobre a rugosidade é evidente para as fresas com e sem revestimento; sendo que os menores valores de rugosidade foram obtidos para as fresas com polimento. Com o aumento da

profundidade de corte um aumento do avanço resultou na diminuição da rugosidade para as fresas sem revestimento. Os parâmetros verticais de rugosidade Rz e Rt mostraram-se mais representativos no estudo da influência do grau de acabamento da fresa de metal duro sobre a rugosidade superficial. Na usinagem das ligas de alumínio a presença de adesões influencia o comportamento de desgaste da fresa e, por conseguinte o acabamento superficial. Para expressar com maior certeza as preposições sobre a presença das de adesões de partículas de alumínio na interface cavaco-ferramenta e sua influência sobre o desgaste e a rugosidade superficial se fazem necessárias análises complementares (vida de ferramenta e Quick-Stop tests).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por disponibilizar a infraestrutura física necessária para realização deste experimento e a ISCAR /Tooltech-MG por fornecer as ferramentas de corte. Agradecimentos Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por conceder suporte financeiro.

Referências

- Bet, L. (1999). Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas Ópticas tipo Seguidor, Doctoral Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 350 p.
- Black, J.T. (2005). Machining of Aluminum and Aluminium Alloys. Metal Machining Handbook, v.16. ASM International, pp. 761 – 803
- Davim, J.P. (2010). Surface Integrity in Machining, Springer Publishing, London, 215 p.
- Klocke, F., König, W. (2000). Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 8th Ed., Springer Publishing, Germany, 547p.
- Polli, M. L. (2005). Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte.” Doctoral Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 214 p.
- List, G; Nouari M.; Géhin, Dd; Gomes, S. Manaud, J.P; Petiticorps, Y; Girot, F. (2005). Wear behaviour of Cemented Carbide tools in dry machining of aluminium alloy. Wear, n. 259. pp 1177-1179.
- Trent, E.M., Wright, P.W. (2000). Metal Cutting. 4 th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 446 p.