

INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO COMPRIMENTO DA ARESTA ALISADORA E AVANÇO POR DENTE NA RUGOSIDADE NO FRESAMENTO FRONTAL DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6063-T6

Raphael Silva Lins

Luciano Antônio Fernandes

Tobias Anderson Guimarães

Universidade Federal do Triângulo Mineiro – Av. Frei Paulino, 30 - Nossa Sra. da Abadia, Uberaba - MG, 38025-180.
raphael.lins@uftm.edu.br; raphael.lins@uftm.edu.br; luciano.fernandes@uftm.edu.br; tobias.guimaraes@uftm.edu.br

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – Rua dos Aimorés, 1451 - Lourdes, Belo Horizonte - MG, 30140-071.

paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Universidade de Federal de Uberlândia – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica. Uberlândia-MG - CEP 38400-902
mbacci@ufu.br

Resumo: A operação de fresamento frontal em regime de acabamento pode gerar imperfeições ou deformações causadas por diversos fatores. Os parâmetros de corte têm sua relevância nestas características. A superfície usinada, quando observadas em detalhes, apresenta descontinuidades deixadas pela passagem dos insertos ao longo do percurso de avanço que afeta a rugosidade superficial da peça. Neste cenário, os insertos com aresta alisadora visam diminuir a rugosidade da peça e aumentar a eficiência do processo em termos de número de peças produzidas. Este trabalho analisa a influência da relação entre o comprimento da aresta alisadora e o avanço por dente (b_s/f_z) rugosidade para uma operação de fresamento frontal em regime de acabamento da liga de alumínio AA6063-T6. A profundidade de corte de 0,5 mm e velocidade de corte de 1100 m/min, foram definidos como fixos, nas três condições de montagem com inserto normal e alisador, totalizando seis insertos por aplicação. As montagens são: somente insertos normais, insertos normais mais um inserto alisador e por fim, insertos normais e dois insertos alisadores. Durante os ensaios utilizou-se insertos de fase plana normais em conjunto com o inserto alisador, código SANDVIK 345N-1305E-KW8 H13A. O avanço por dente foi objeto de estudo na análise dos efeitos sobre a rugosidade e a sua correlação com o aumento da taxa de remoção de material. Os resultados permitem concluir que com a utilização de um inserto alisador no processo de fresamento, proporciona rugosidade média (R_a) e desvio médio quadrático (R_q) menores, se comparados com os ensaios que utilizam exclusivamente insertos normais (standard), independente das condições do avanço por dente. Da mesma forma, empregando dois insertos alisadores, distantes um do outro em 180°, o efeito sobre o acabamento superficial é mais expressivo, garantindo inclusive um porta-fresa mais balanceado e uma usinagem menos ruidosa, mesmo em condições de velocidade de avanço (V_f) alta.

Palavras-chave: Fresamento frontal, inserto alisador, acabamento superficial, alumínio AA6063-T6

1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio primárias representadas pela série 6063, possuem teores de silício e magnésio entre 0,8 e 1,2%, podem ser facilmente extrudadas e podem ser tratadas termicamente, eliminando a necessidade de uma operação separada de tratamento térmico de solubilização (TIRYAKIOGLU E STANLEY, 2003). Essas ligas de alumínio, apresentam alterações em suas propriedades com relação ao alumínio puro, também apresentarão comportamentos diferentes durante os processos de usinagem. Cada elemento agrega diferentes características à usinagem do alumínio, como melhorar a quebra do cavaco, agir como lubrificantes, diminuir o coeficiente de atrito com a ferramenta, entre outros. Os materiais compostos pela liga Al-Si, embora muito utilizados, não são de fácil usinabilidade. Isto se deve ao fato do silício agregar à liga característica abrasivas. Essa abrasividade é proporcional ao percentual de silício, e intensifica bastante o desgaste, reduzindo drasticamente a vida útil das ferramentas de corte. Para contornar este problema, são utilizados os fluidos de corte, revestimentos apropriados e até mesmo ferramentas de diamante policristalino (PARREIRAS, 2014).

Gonçalves (2012) avaliou a usinabilidade das ligas 6063, 6082, 6351, 6005^A e 6061. O autor afirma que a liga 6063 apresentou as maiores forças de avanço para velocidades de corte superiores a 200 m/min devido a sua maior capacidade de deformação e consequentemente maior ductilidade que implicou em maiores valores de grau de recalque. O autor também comenta que a liga 6063 apresentou os menores valores de rugosidade R_q em comparação com as demais ligas investigadas na operação de torneamento, apresentando cavacos com maiores dimensões devido a uma maior deformação plástica deste material.

O processo de fresamento é aplicado na fabricação de várias peças e componentes simples e complexos, apresenta-se como um dos mais importantes da indústria, com inúmeras pesquisas relacionando aspectos como alta taxa de remoção de cavaco, variedade nas geometrias das ferramentas, alta precisão, rapidez de execução associado a um custo reduzido, utilizado na fabricação de peças com geometrias complexas, em que se faz necessária uma boa resistência mecânica, abrindo possibilidades para a obtenção de produtos de alta qualidade (SOUTO, 2014).

Segundo Diniz *et al.* (2014), as operações em fresamento podem ser categorizadas em: tangencial ou periférico e frontal ou topo. O fresamento tangencial ou periférico é um processo de geração de canais, preferencialmente, mas pode gerar superfícies planas dependendo da situação, conforme Figura 1(a), e que tem o eixo de rotação paralelo à superfície fresada.

O fresamento frontal ou de topo é uma operação para usinagem de superfícies planas e cujo eixo de rotação é perpendicular à superfície que está sendo gerada. A Figura 1(b) é uma representação de uma fresa frontal em relação a peça.

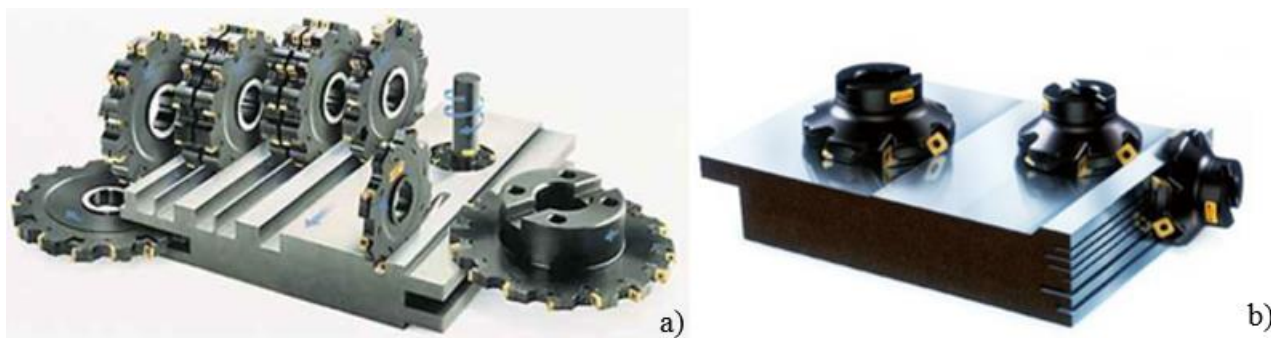


Figura 1. Tipos de operações de fresamento: (a) tangencial ou periférico, (b) frontal ou de topo. (SANDVIK COROMANT, 2010)

No fresamento, a relação entre o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também é de grande importância. Portanto, baseado nesta relação, distingue-se entre o fresamento concordante e o fresamento discordante. No fresamento discordante, o sentido de movimento de corte é contrário ao avanço da peça. O corte se inicia a partir de uma espessura zero e aumenta até o ponto máximo na saída da aresta de corte da zona de contato com a peça. Antes que a aresta efetivamente inicie o corte, ela tenderá a escorregar pelo material com uma certa pressão. Devido essa pressão, tanto a peça quanto a ferramenta têm a tendência de se afastar. A distância pela qual a aresta escorrega, antes de iniciar o corte é resultado das propriedades do material da peça, da fixação e da rigidez da máquina. Este fenômeno de escorregamento gera um desgaste maior na ferramenta do que o próprio corte, e interfere também, diretamente nos erros de forma da peça (MACHADO *et al.*, 2009).

No fresamento concordante, os movimentos de corte e avanço da peça tem aproximadamente o mesmo sentido. A característica principal desta técnica é que a ferramenta empurra a peça contra a mesa da máquina, sendo recomendado no caso de fixação deficiente. Porém, o principal inconveniente de sua aplicação é que há uma componente que empurra a peça contra a ferramenta, gerando solavancos e vibrações que impossibilitam a aplicação no caso de folgas no fuso das máquinas (SANDVIK COROMANT, 2010; STEMMER, 1995). No fresamento concordante a aresta inicia o corte repentinamente a partir de uma espessura de cavaco máxima, que vai diminuindo até chegar a uma espessura de corte igual a zero. Segundo Sandvik Coromant (2010), no fresamento concordante, a pastilha começa a cortar gerando um cavaco de grande espessura. Isso evita o efeito de deformação com menos calor e o mínimo de possibilidade de encruamento. A grande espessura do cavaco é vantajosa e as forças de corte tendem a empurrar a peça contra a fresa, mantendo a pastilha no corte.

Machado *et al.* (2009) afirmam que a condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície, de forma que o termo integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e por isso, abrange mais do que a textura da superfície ou a sua forma geométrica.

A rugosidade é um dos fatores importantes na avaliação da qualidade da peça dos componentes usinados, porque influencia as características funcionais da peça, como: ajustes e resistência à fadiga. O objetivo principal da análise quantitativa da rugosidade é a identificação de uma coleção de parâmetros suficientes para caracterização do acabamento superficial (CHEVRIER *et al.*, 2003). Desta forma o estudo da operação de fresamento de topo de acabamento é importante, pois uma das maneiras de se conseguir menores rugosidades é utilizando insertos com geometria alisadora em conjunto com insertos de geometrias normais, montadas simultaneamente no porta-fresa. O inserto alisador, como possui maior fase plana (b_s), retira a porção de material deixado pelos demais insertos e alisa os picos de rugosidade até um ponto chamado de ponto de saturação, que equivale dizer que foi obtida a máxima relação b_s/F_z para a qual tem-se os menores valores de rugosidade (ALTINTAS, 2000). Toledo (2018) conseguiu atingir este

ponto de saturação para uma razão de 7 com uma configuração de insertos normais e uma razão de 10 na configuração com um inserto alisador e não sendo observando maiores mudanças para uma terceira configuração com dois insertos alisadores, o que implica um ganho, em termos de efetividade no processo, de 30 por cento em média.

Segundo Sandvik Coromant (2010) os insertos alisadores trabalham de maneira mais eficiente com alto avanço por rotação f_n , em porta-fresas de diâmetros maiores com passo extrafino. O avanço por rotação pode ser aumentado aproximadamente quatro vezes, enquanto ainda mantém boa qualidade superficial. Quando o avanço por volta excede 80% do comprimento da fase paralela b_s , em insertos normais, uma aresta alisadora melhorará a superfície retirando os picos de rugosidade. O batimento axial do porta-fresa, que depende da inclinação do fuso, do tamanho do porta-fresa, da montagem e da precisão de seu ajuste, influencia a ondulação da superfície usinada. A fase alisadora em alto relevo dentre as demais compensará este efeito e produzirá uma superfície com melhor planicidade e retitude. Recomenda-se para tal propósito um avanço por rotação limitado a 60% da fase plana, do inserto alisador, para garantir a redução da ondulação e melhora no acabamento. A Figura 2 apresenta qualitativamente o ganho no parâmetro de corte em termos de avanço por aresta em relação a um mesmo nível de acabamento superficial.

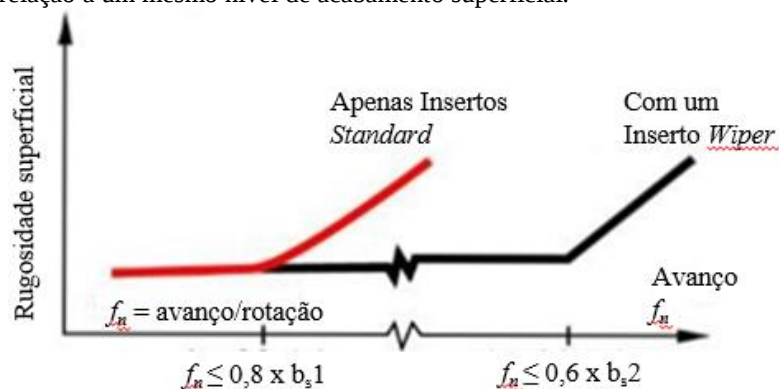


Figura 2. Comparação da rugosidade sem e com a utilização de insertos alisadores (SANDVIK COROMANT, 2010)

Neste contexto, a utilização de porta-fresas com insertos com geometria alisadora é uma das formas existentes de se obter um acabamento superficial satisfatório. Por outro lado, devido ao fato de apresentar face plana considerável e trabalhar em plano abaixo dos insertos normais, sendo que o inserto alisador fica sujeito a maiores cargas, haverá maior tendência à vibração, que pode contribuir para uma aceleração no desgaste (SANDVIK COROMANT, 2010). Porém, Mourão (2010) afirma que a tecnologia de bordas alisadoras previne a ocorrência de trepidação e vibração no processo de fresamento frontal em regime de desbaste. Portanto, é viável que para aumentar a produtividade utilize taxas de avanço mais altas e/ou corte profundidades, mantendo, ou mesmo melhorando, a qualidade das superfícies usinadas. Isso é por que hoje em dia existe uma tendência de utilização deste tipo de insertos em operações com maior energia de corte.

As ferramentas usadas em operações de acabamento geralmente têm ângulos de saída positivos para reduzir as forças de corte e obter melhor acabamento superficial, entretanto, esta geometria faz com que a aresta de corte seja mais frágil do que as ferramentas de desbaste. Em geral, o acabamento utiliza menores profundidades de corte e são empregadas maiores velocidades de corte para obter o melhor acabamento e chegar à geometria e às dimensões finais da peça (TOH, 2004).

Boothroyd e Knight (1989), afirmam que a rugosidade superficial final obtida durante uma operação de usinagem pode ser considerada como a soma de dois efeitos independentes: a rugosidade superficial “ideal”, a qual é um resultado da geometria da ferramenta e do avanço da ferramenta. Sendo a rugosidade “natural”, aquele resultado de irregularidades da operação de corte.

Segundo Diniz *et al.* (2014), a utilização do fresamento concordante, como já visto, pode melhorar o acabamento da peça, devido à diminuição da vibração. Na utilização de porta-fresa de faceamento, os insertos apresentam uma fase plana como aresta secundária e para que as porções da peça já usinada possam ser alisadas pelos dentes insertos subsequentes àquele que realizou o corte deve ter comprimento (b_s) de 3 a 10 vezes o avanço por dente. Com isso, obtém-se uma superfície com melhor acabamento do que com insertos com raio de ponta.

Devido à tolerância dos insertos, à folga nos mancais do eixo-árvore e às rebarbas ou defeitos na fixação dos insertos no porta-fresa, nem sempre as arestas de uma fresa de facear estão todas em um mesmo plano paralelo à superfície usinada. Quando isso ocorre, somente os insertos mais expostos geram a superfície acabada e são responsáveis pela rugosidade da peça (DINIZ *et al.*, 2014). Quando se tem uma fase plana (b_s) grande e que mais que uma aresta de corte esteja no mesmo plano, assim mais de um inserto é responsável por manter baixa a rugosidade. Nesse caso, as arestas cortantes mais expostas devem estar distribuídas equidistantes angularmente na periferia do porta-fresa, para que suas fases planas tenham seus passes superpostos.

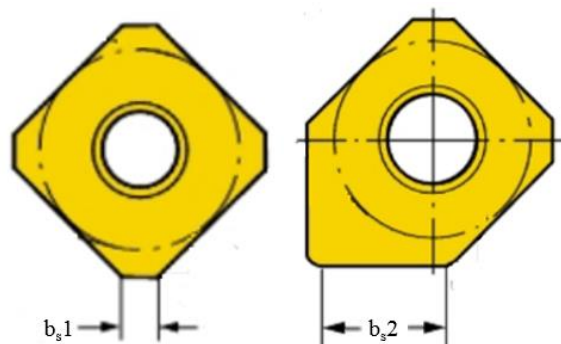


Figura 3. Diferença do comprimento de aresta alisadora do inserto *Standard* (b_{s1}) para o inserto *Wiper* (b_{s2}).

As mudanças na geometria das bordas do inserto alisador podem causar variações significativas da energia específica de corte (Rodrigues & Coelho, 2007), uma circunstância que deve ser levado em consideração na escolha do máquinas-ferramentas mais eficientes e acessórios de trabalho. De um modo geral, a estimativa precisa das forças de corte é importante para planejar e configurar processo de usinagem de alta produtividade. No entanto, esta estimativa depende criticamente da previsão da energia específica de corte, que por sua vez, depende da dureza do material a ser usinado, nos parâmetros de corte e na combinação da geometria do porta-ferramenta e dos inserts. Desta forma, a busca por condições de fresamento que propiciem um melhor acabamento superficial e uma melhor integridade da superfície usinada tem sido o alvo dos trabalhos de vários pesquisadores (SILVA et al., 2010; SHEN et al., 2011; RAO et al., 2013; SOUTO et al., 2014; Wang et al., 2015; Toledo et al., 2018). Portanto, o presente trabalho tem como contribuição a análise da influência da relação b_s/f_z no acabamento superficial no fresamento de faceamento da liga de alumínio 6063, comparando inserts de metal duro revestidos normais (*standard*) com a inserção de inserts alisadores (*Wiper*) intercalados com inserts normais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho irá analisar a influência da relação entre o comprimento da aresta alisadora e o avanço por dente (b_s/f_z) no acabamento superficial para uma operação de fresamento frontal em regime de acabamento da liga de alumínio AA 6063-T6. Conforme especificações do fabricante, a Tabela 1 apresenta a quantidade dos principais elementos de liga.

Tabela 1 – Composição percentual dos principais elementos da liga de alumínio 6063.

Liga	Composição Química (%)					
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
6063	98,84	0,43	0,19	0,01	0,02	0,51

Foram preparados 8 corpos de prova com dimensões 30 mm x 60 mm x 146 mm e microdureza média de 80,53 HV $\pm$ 0,650. Para a usinagem, os corpos de prova foram fixados em uma morsa hidráulica. Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se um porta-fresa para faceamento em operação de fresamento frontal, código SANDIVIK 345-080Q27-13M, corpo de porta-fresa de facear CoroMill® 345, com diâmetro de corte (DC) de 80 mm, com ângulo de posição primário 45°. Durante os ensaios e réplicas utilizou-se inserts de face plana normais, código SANDIVIK 345R-1305E-KLH13A em conjunto com o inserto alisador, código SANDIVIK 345N-1305E-KW8 H13A. Os parâmetros de corte fixos foram: velocidade de corte em 1100 m/min e profundidade de corte em 0,5 mm e penetração de trabalho de 60 mm. Já o avanço foi variado em vários níveis, como é apresentado na Tabela 2.

Os parâmetros de rugosidade medidos foram a rugosidade média aritmética (R_a) e o desvio médio quadrático (R_q). Foram realizadas 3 medições em cada condição, aplicando um filtro gaussiano e o *cut-off* de 0,8. O equipamento utilizado para as medições foi o perfilômetro modelo Form Talysurf 5.0.

Os experimentos em negrito na tabela 2 foram tratados estatisticamente através de um fatorial multinível, afim de constatar a melhor configuração de inserts para uma melhor rugosidade média quadrática e a verificar a influência da relação entre a largura da aresta alisadora e o avanço por dente (b_s/f_z) no acabamento superficial.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. O equipamento utilizado foi um Centro de Usinagem CNC modelo 1250D, fabricado pela ROMI, com 18 KW de potência no eixo principal e rotação máxima de 12.000 rpm. Foi utilizado o fluido de corte solúvel MV AQUA 180, fabricado pela VCI, protetivo anticorrosivo aplicado a usinagem, lote de fabricação 09027001001, na concentração de 5%, medida com refractômetro, fabricante ATC. O potencial hidrogeniônico (pH) foi monitorado durante todo o experimento para que se mantivesse entre 8,1 e 9 para manter um pH alcalino recomendado pelo fabricante.

Tabela 2 – Parâmetros de avanço utilizados para os testes

Ensaio	fz	fn	A - 6 insertos normais		B - 5 insertos normais e 1 inserto alisador		C - 4 insertos normais e 2 insertos alisadores	
			bs/fz**	Vf	bs/fz***	Vf	bs/fz***	Vf
1*	0,05	0,3	40	1354,026	160	1354,0263	160	1354,0263
2	0,07	0,42	28,5714	1895,637				
3*	0,09	0,54	22,2222	2437,247	88,8889	2437,247	88,8889	2437,247
4*	0,14	0,84	14,2857	3791,274	57,14286	3791,2736	57,1428	3791,2736
5	0,2	1,2			40	5416,1052	40	5416,1052
6*	0,23	1,38	8,6956	6228,1332	34,78261	6228,5209	34,78261	6228,5209
7	0,26	1,56	7,6923	7040,9367	30,76923	7040,9367		
8	0,28	1,68	7,1428	7582,0752				
9	0,3	1,8	6,6667	8124,158				
10*	0,33	1,98	6,0606	8936,0172	24,24242	8936,5735	24,24242	8936,5735
11	0,36	2,16	5,5556	7588,3924				
12	0,56	3,36	3,5714	15164,15			14,2857	15164,15
13	0,8	4,8			10	21663,072	10	21663,072
14*	0,92	5,52	2,1739	24912,53	8,6956	24912,53	8,6956	24912,53
15	1,2	7,2			6,6667	32494,608	6,6667	32494,608
16	1,35	8,1	1,4814	36556,434	5,9259	36556,434		
17	1,56	9,35					5,1283	42197,859
18*	1,76	10,6	1,1263	47838,284	4,5454	47838,284	4,5454	47838,284

* Através da análise de variância ANOVA utilizando testes individuais de Fisher os valores em negrito usinaram nas condições de montagem A, B e C.

**Para a configuração de montagem A, para geometria para inserto normal (*standard*), a largura de aresta b_s é igual a 2 mm, conforme informado pelo fabricante SANDVIK COROMANT em seu catálogo de ferramentas.

*** A largura de aresta b_s considerada para as configurações de montagem B e C, para geometria para inserto alisador, foi 8 mm, conforme informado pelo fabricante SANDVIK COROMANT em seu catálogo de ferramentas.

Antes do início dos testes, foram avaliadas o batimento axial e radial dos insertos para cada configuração de conjunto da fresa, utilizando comparador digital *Pressetting* com resolução de 0,001 mm. Todos os insertos apresentaram batimento radial igual a 0,000 mm. A Tabela 3 mostra os valores de desvio axial medidos em milímetros.

Tabela 3 – Posicionamento axial de cada inserto para as configurações de montagem A, B e C.

Montagem	A (6 insertos normais)						B (5 insertos normais 1 inserto alisador)						C (4 insertos 2 insertos alisadores)					
Posição	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
+ ↑				0,013	0,008					0,013	0,008						0,008	
0 (ref.)			0						0						0			
- ↓	0,041	0,015				0,01	0,073	0,015				0,01	0,073	0,015		0,037		0,01

Os insertos com geometria normal (*standard*) tinham batimento axial na faixa de - 0,041 a 0,013 mm e os insertos de geometria alisadora na faixa de - 0,073 a 0,008 mm abaixo do plano de trabalho da fresa.

A posição do inserto alisador no conjunto B foi escolhida aleatoriamente. Na montagem C, o primeiro inserto alisador foi colocado na mesma posição usada na montagem B e o segundo inserto alisador (*Wiper*) foi colocada a 180° da primeira.

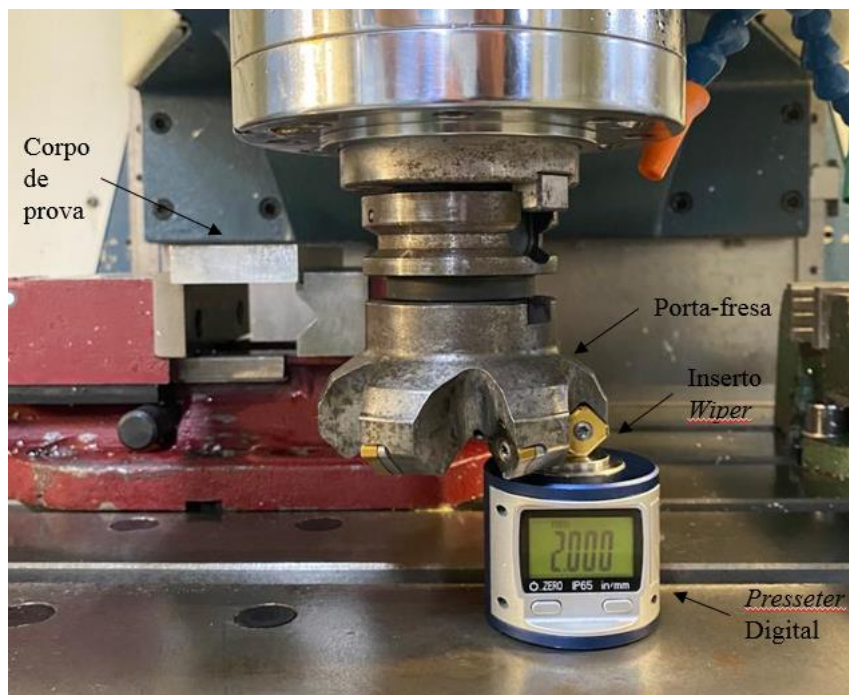


Figura 4. Posicionamento axial medido com comparador digital *presseter*.

3. RESULTADOS

As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_q em função do avanço por dente (f_z) respectivamente, versus avanço por dente (f_z), para três conjuntos de configurações: A - 6 insertos normais; B - 5 insertos normais e 1 inserto de alisador; e C - 4 insertos normais e 2 insertos de alisadores.

Pode-se observar nestas figuras que os valores de rugosidade R_a e os de R_q são menores para configurações B e C, ou seja, montagem com inserto alisador.

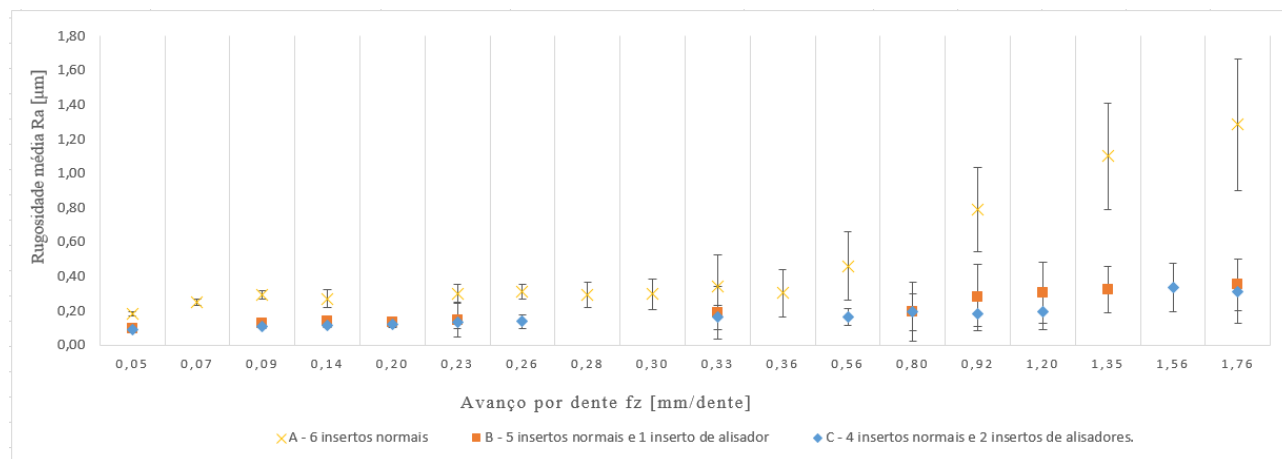


Figura 5. Rugosidade R_a em função do avanço por dente f_z .

O comportamento do parâmetro R_q com a variação do avanço por dente foi análogo ao da rugosidade R_a . O desvio médio quadrático R_q mantém-se em torno de 0,4 µm para avanços f_z menores 0,36 mm/dente, que estima-se ser o ponto de saturação (ALTINTAS, 2000), apresentando uma tendência de elevação de R_q para avanços maiores. A rugosidade R_q com a aplicação de 1 inserto alisador (montagem B) ou 2 insertos alisadores (montagem C) apresentou um comportamento estável até o máximo avanço por dente testado neste trabalho, $f_z = 1,76$ mm/dente. Este fato pode ser explicado em função da maior área de contato na superfície da peça proporcionado por 2 insertos alisadores.

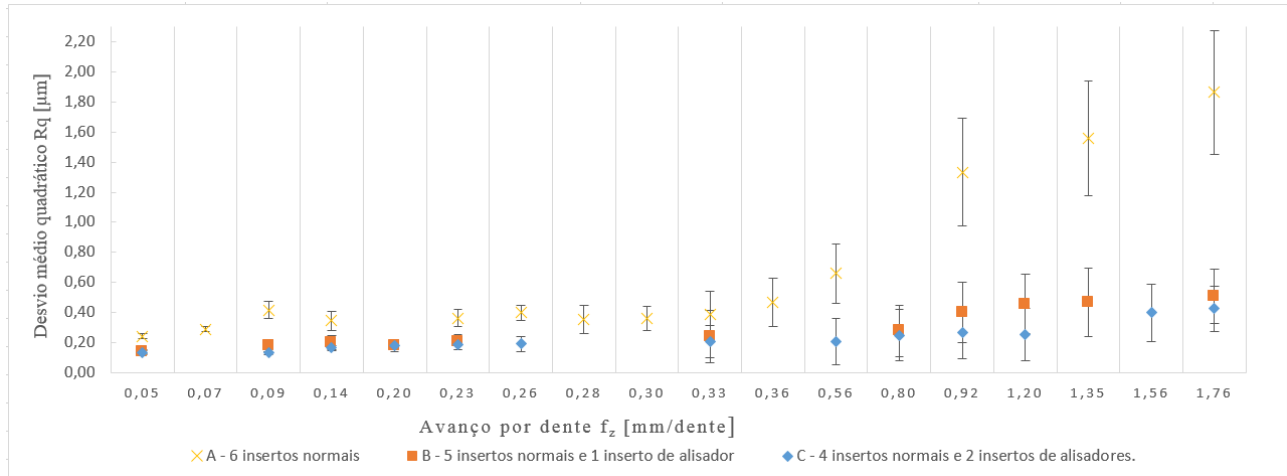


Figura 6. Rugosidade R_q em função do avanço por dente f_z .

Levando-se em consideração o comportamento das rugosidades R_a e R_q em função do avanço por dente com o uso de insertos alisadores, pode-se constatar que a fresa com 6 insertos normais apresentou excelentes resultados até avanço por dente até 0,33 mm/dente, que corresponde a uma relação $b_s/f_z = 6,06$, com utilização praticamente total do comprimento da aresta plana. Acima desta relação (b_s/f_z) incorre em dispersões mais altas nos valores de rugosidade que apontam para o ponto de saturação. Com a utilização de insertos alisadores as rugosidades se mantiveram abaixo de μm durante toda faixa de avanço por dente (f_z) avaliada no experimento. Desta forma, seria interessante ampliar a faixa de estudo para f_z maiores, afim, de encontrar o ponto de saturação do conjunto montado com a configurações B e C. Segundo Taylor Hobson (2011) a rugosidade R_a para processo de fresamento varia entre 0,8 μm e 3,6 μm . Segundo Groover (2010) a rugosidade média deve variar entre 1 μm e 6 μm para este processo de fabricação. As rugosidades encontradas utilizando insertos alisadores com f_z de 1,76 mm/dente se assemelham aos indicados na literatura para processos abrasivos de retificação.

Na análise estatística fatorial multinível realizada nas condições para f_z , indicados em negrito, na Tabela 2, foi realizada análise de variância ANOVA e gráfico de Pareto para efeitos padronizados e também gráfico de efeitos principais para R_q . O planejamento experimental, mostrado na Tabela 4, é uma abordagem estatística para a otimização da reação e do processo que permite a variação de diferentes fatores ao mesmo tempo, com o objetivo de selecionar o espaço de reação para obter os valores ideais.

Tabela 4 – Planejamento experimental para os ensaios realizados nas três configurações de montagem A, B e C.

Fator	Níveis	Valores
f_z (mm/dente)	7	0,05; 0,09; 0,14; 0,23; 0,33; 0,92; 1,76
Ferramenta (montagens A, B e C, respectivamente)	3	0; 1; 2

A Tabela 5 mostra que, para um índice de significância $\alpha = 0,05$ para cada condição de avanço f_z analisada, apresentou valor $p = 0,000$ menor que o índice de significância, desta forma as variáveis de entrada influenciaram na superfície de resposta, podendo ser comprovada pelo gráfico de pareto (Fig. 7-a) que na análise em conjunto os dois fatores configuração de montagem de ferramenta (montagem A,B e C) e avanço por dente (f_z), constatando que os mesmos influenciam diretamente na superfície de resposta, podendo descartar uma análise individual de cada fator.

Tabela 5 – Análise de variância de ajuste do modelo de regressão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	8,57192	0,42860	129,35	0,000001
Linear	8	7,30589	0,91324	275,61	0,000006
f_z	6	6,20765	1,03461	312,23	0,000016
Ferramenta	2	1,09824	0,54912	165,72	0,000023
Interações de 2 fatores	12	1,26603	0,10550	31,84	0,000129
f_z *Ferramenta	12	1,26603	0,10550	31,84	0,000129
Erro	21	0,06958	0,00331		
Total	41	8,64150			

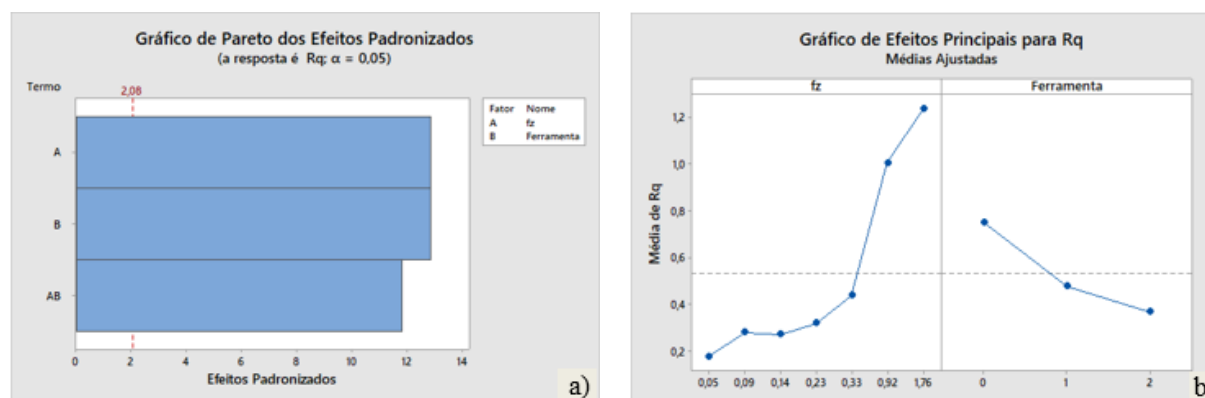


Figura 7. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados (a), gráfico de efeitos principais para R_q (b).

No gráfico de efeitos principais para R_q (Fig. 7-b) constata-se que a rugosidade aumenta com o aumento de avanço por dente e que a configuração que melhor apresentou resultados foi a configuração 2 (C) que consiste de 4 insertos normais e 2 insertos alisadores. Sendo a média de todos os valores analisados nas duas condições em que se utilizou insertos alisadores valores médios ficaram abaixo de $0,6 \mu\text{m}$.

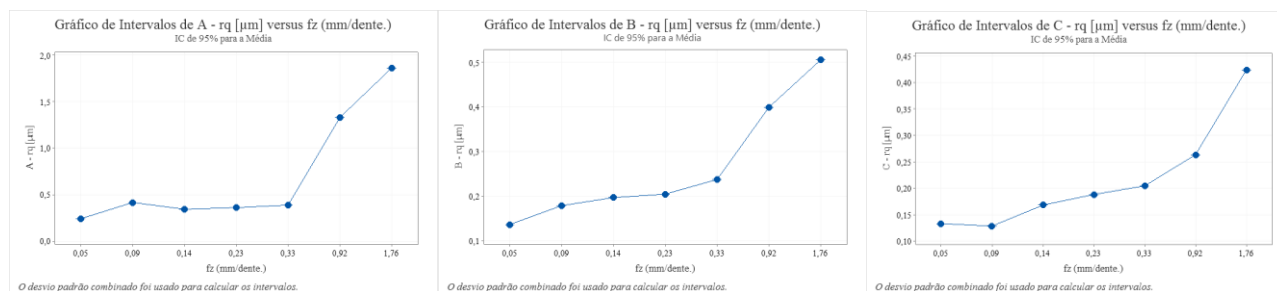


Figura 8. Rugosidade média quadrática em função do avanço por dente (f_z) para as configurações de montagem A) 6 insertos normais, B) 5 insertos normais e um alisador e C) 4 insertos normais e 2 alisadores montados a 180° .

Através da análise de variância ANOVA, Figura 8, utilizando testes individuais de Fisher para determinar se há diferença entre as médias de cada condição de avanço f_z foram obtidos os gráficos de intervalos de R_q versus f_z (para as configurações de montagem A, B e C) com intervalo de confiança de 95%. Para o gráfico A as condições de corte entre 0,05 e 0,033 mm/dente o valor de p foi maior que 0,05 então as diferenças entre as médias analisadas não são estatisticamente significativas para fresamento com insertos normais. O gráfico B para 5 insertos normais e 1 inserto alisador nas condições de avanço entre 0,09 a 0,33 mm/dente as diferenças entre as médias analisadas também não são estatisticamente significativas. O gráfico C para 4 insertos normais e 2 insertos alisadores as condições de corte f_z entre 0,05 até 0,14 mm/dente não são estatisticamente significativas para as médias de R_q analisadas.

4. CONCLUSÃO

Para os três conjuntos de configurações analisados a tecnologia de insertos alisadores (*Wiper Edge*) para fresamento frontal em regime de acabamento possibilitou, nas três condições de ferramenta testadas e para avanço por dente menor ou igual a 0,33 mm/dente apresentaram rugosidades R_a e R_q iguais ou menores que $0,4 \mu\text{m}$ com dispersão inferior a 2%. Embora, pela análise de variância ANOVA utilizando testes individuais de Fisher, pode-se concluir através do valor de $p \geq 0,05$ não apresentaram diferenças entre as médias analisadas, portanto, estatisticamente, não houve nenhuma condição que sobressaísse dentre as configurações A e B, respectivamente. Já na configuração C este efeito foi constatado para avanço por dente (f_z) entre 0,05 até 0,14 mm/dente.

Nas configurações A e B dos conjuntos analisados para os avanços 0,92 e 1,76 mm/rot o valor de p obtido foi inferior ao índice de significância ($p \leq 0,05$), podendo inferir que há uma diferença significativa entre as médias analisadas. Pode-se destacar entre os resultados, os valores de R_q , sendo significativamente maiores para fresamento com insertos nas configurações A, B e C, se comparado com avanços menores 0,33 mm/rot. Foi possível inferir que para avanços por dente (f_z) abaixo de 0,05 mm/rotação haverá influência direta na redução da rugosidade, nas configurações B e C que utilizam insertos alisadores.

Foi possível constatar nas três configurações de montagem (A, B e C) do cabeçote fresador obtiveram-se rugosidades médias (R_a) iguais ou inferiores a R_a $0,4 \mu\text{m}$ em fresamento de faceamento de ligas de alumínio AA 6063-

T6 para máxima largura de atuação da aresta de corte de 28% para insertos normais (*standard*) e 22% para insertos alisadores (*wiper*). Assemelhando-se aos indicados na literatura para R_a obtidos em processos abrasivos de retificação.

A Tabela 4 demonstrou valores de $p \leq \alpha$ para cada condição de f_z analisada, desta pode-se afirmar que as variáveis de entrada influenciaram na resposta e através do gráfico de Pareto analisando-se em conjunto os dois fatores configuração de montagem de ferramental (A, B e C) e avanço por dente (f_z) influenciaram diretamente na rugosidade R_a e R_q obtidas na usinagem da liga de alumínio AA6063-T6.

As rugosidades médias (R_a) para avanço f_z 1,76 mm/min demonstraram uma diminuição drástica da condição de montagem A - 6 insertos normais com 1,2844 μm em relação a configuração B - 5 insertos normais e 1 inserto de alisador 0,3543 μm e o cabeçote fresador C - 4 insertos normais e 2 insertos de alisadores 0,3137 μm . O que demonstra claramente a possibilidade do uso dessas montagens (B e C) no processo de fresamento frontal de desbaste aumentando a produtividade e melhorando a eficiência tendo em vista que para obter rugosidades semelhantes as encontradas na configuração A será possível trabalhar com avanços por dente (f_z) superiores a 1,76 mm/dente. Sendo possível estipular avanços para desbaste entre 4 e 4,8 mm/dente devido a relação b_s/f_z limitando em 60% da fase plana, afim de garantir um bom acabamento. O que corrobora com a indicação dos fabricantes de ferramenta que afirmam que do acabamento, os insertos alisadores (*Wiper Edge*) estão sendo usados regularmente para desbaste com aumento de produtividade sem comprometer a qualidade da superfície (Kennametal 2010; Mitsubishi 2010), complementando as indicações de Sandvik Coromant (2010) que os insertos alisadores trabalham de maneira mais eficiente com alto avanço por rotação f , em fresas de diâmetros maiores com passo extrafino.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, aos órgãos de fomento CAPES, CNPQ, Fapemig, ao apoio técnico empresa BFTECH INDÚSTRIA e à Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

6. REFERÊNCIAS

- Altintas, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Nova York : Cambridge University Press, 2000.
- Boothroyd, G.; Knight, W. A. *Fundamentals of machining and machine tools. 2nd edition* – New York: Marcel Dekker, 1989.
- Chevrier, P. et al. Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 11, p. 1135-1142, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00122-6).
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L.; *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: Art Lîber Editora, 2014.
- Gonçalves, R.A. *Investigação da Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX*. 2012. 107f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Groover, M. P., *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING: Materials, Processes, and Systems*. 4Th Edition. ISBN 978-0470-467002. Lehigh University: JOHN WILEY & SONS, INC., 2010.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 2009.
- Mourão, A.; Slatineanu, L.; Coelho, A. The effect of wiper edge inserts on the specific cutting energy in face milling of aluminium alloys. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, v. 2, n. 2, p. 71-77, 2010.
- Parreiras, L. G. S. *Avaliação dos Esforços de Corte no Torneamento da Liga de Alumínio Silício (A356) com Diferentes Antelias*. Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais. 2014.
- Rodrigues, A.R., Coelho, R.T. (2007). Influence of the Tool Edge Geometry on Specific Cutting Energy at High-Speed Cutting, *Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Vol. XXIX, No. 3, pp. 279-283.
- SANDVIK COROMANT. Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação. 2.ed. São Paulo: Elanders, 2010.
- Shen, Y.; Chen Y.; Zhang, L.; Fang, H.; Pang, J; Liu, M.; Wang, S.; Ma, X.; Zhang, J.; Liu, Z. *Effect of radial depth on vibration and surface roughness during face milling of austenitic stainless steel*. Trans. Tianjin University, vol. 17, p. 336-339, 2011.
- Silva, L.C.; Pena, J.L.O.; Machado, A.R.; Duarte, M.A.V. *Estimativa da altura da rebarba formada no fresamento pelo monitoramento de sinais de vibração*, 6º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 9p., 2010.
- Souto, U.B.; Melo, J.F.N.; Votória, B.C.R. *Análise de estágios de desgaste de ferramentas no fresamento do aço AISI 4340 através do sinal de vibração*. 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2014, p. 9, 2014.
- Stemmer, C. E. *Ferramentas de Corte II*. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1995.
- TAYLOR HOBSON LIMITED. Exploring Surface Texture. 2 New Star Road, List No. 600-14/03. 7th edition. England, Leicester LE4 9JQ: AMETEK-ultra precision technologies, 2011.

- Tiryakioglu, Murat; Stanley, James T. *Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys*. [ed.] George E. Totten y D. Scott MacKenzie. Handbook of Aluminum (Physical Metallurgy and Process), p. 81-209, 2003.
- Toh, C.K. Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Dublin, v. 167, p. 110-118, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.004>.
- Toledo, J. V. R. et al. Performance of wiper geometry carbide tools in face milling of AISI 1045 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 10, p. 1-15, 2018.
- Wang, Meng et al. Tool wear monitoring of wiper inserts in multi-insert face milling using three-dimensional surface form indicators. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 137, n. 3, 2015. DOI: 10.1115/1.4028924

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF THE RATIO BETWEEN LENGTH OF THE WIPER EDGE AND FEED PER TOOTH ON SURFACE ROUGHNESS IN FACE MILLING OF ALUMINUM ALLOY AA6063-T6

Raphael Silva Lins

Luciano Antônio Fernandes

Tobias Anderson Guimarães

Universidade Federal do Triângulo Mineiro – Av. Frei Paulino, 30 - Nossa Sra. da Abadia, Uberaba - MG, 38025-180.
raphael.lins@ufu.br; raphael.lins@uftm.edu.br; luciano.fernandes@uftm.edu.br; tobias.guimaraes@uftm.edu.br

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – Rua dos Aimorés, 1451 - Lourdes, Belo Horizonte - MG, 30140-071.
paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Universidade de Federal de Uberlândia – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica. Uberlândia-MG - CEP 38400-902
mbacci@ufu.br

Abstract. The face milling operation in finishing conditions leaves marks on the machined surface that, when observed in detail, present discontinuities left by the passage of the inserts along the feed path that affects the surface roughness of the part. In this scenario, inserts with a wiper edge aim to reduce the roughness of the part and increase the efficiency of the process in terms of the number of parts produced. This work analyzes the influence of the ratio between the length of the wiper edge and the feed per tooth (bs/fz) on the surface finish for a face milling operation in finishing conditions of aluminum alloy AA6063-T6. The depth of cut of 0.5 mm and cutting speed of 1100 m/min were fixed in the three mounting conditions with normal insert and wiper, six inserts in total. The assemblies are: normal inserts only, normal inserts plus a wiper insert and finally, normal inserts and two wiper inserts. During the tests, normal flat-phase inserts were used together with the wiper insert, code SANDVIK 345N-1305E-KW8 H13A. Feed per tooth was studied in the analysis of the effects on roughness and its correlation with the increase in material removal rate. The results allow to conclude that the use of a wiper insert in the milling process provide lower roughness when compared to tests using exclusively normal (standard) inserts, regardless of the conditions of feed per tooth. In the same way, using two wiper inserts, 180° apart, the effect on the surface finish is more expressive, guaranteeing even the most balanced cutter holder and a less noisy machining, even in conditions of high feed speed (Vf).

Keywords: Face milled, wiper insert, surface finish, aluminum AA6063-T6

RESPONSIBILITY NOTICE

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