

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO FRESAMENTO FRONTAL DA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO (A356) QUANDO MANTIDO CONSTANTE A PRODUÇÃO DE PEÇAS

Rodrigo da Silva Barbosa, rodrigo.s.barbosa@prof.una.br¹

Deibe Valgas dos Santos, deibe.santos@prof.una.br¹

Durval Uchôas Braga, durval@ufsj.edu.br²

Frederico Ozanan, Nevesfred@ufsj.edu.br²

¹Centro Universitário UNA; Av. Afonso Vaz de Melo, 465, Barreiro, CEP: 30640-070 Belo Horizonte - MG

²Universidade Federal de São João del-Rei / UFSJ – Praça Frei Orlando 170, Centro, CEP 36.307-352 São João del-Rei - MG.

Resumo: Com a evolução do parque industrial na produção de peças automotivas e aeronáuticas, observa-se que o processo de fresamento tem se mostrado mais versátil e flexível na usinagem dos materiais, principalmente de moldes e matrizes. Aliado as características de redução de peso e excelente resistência mecânica, o alumínio e suas ligas têm substituído o aço e o ferro fundido em vários destes produtos. Neste sentido, optou-se por desenvolver uma pesquisa para analisar esforços de corte e integridade superficial no fresamento frontal da liga de Alumínio-Silício - A356 quando utilizado lubro-refrigeração aplicada em abundância (dois níveis), e alterado os parâmetros como o avanço por dente (três níveis) e velocidade de corte (dois níveis), mantendo-se sempre constante o volume de material usinado, ou seja, a mesma produção de peças. As variáveis de resposta do processo de fresamento foram as força de corte (F_c), indiretamente monitoradas pelo momento torsor (M_t) e a de avanço (F_f), assim como, os parâmetros de rugosidade média (R_a) e máxima (R_y). Como principais resultados, destacam-se que as rugosidades se mostraram inversamente proporcional ao efeito lubrificante do processo. Os esforços de usinagem também se mostraram menores quando utilizados velocidade de corte e avanço por dente no fresamento maiores. Outra questão diz respeito a força de avanço que se mostrou dependente da interação da velocidade de corte com o meio lubro-refrigerante, sendo menor para os níveis maiores dessas variáveis.

Palavras-chave: Fresamento frontal; Alumínio-Silício; Força de corte; Fluido Lubro-refrigerante

1. INTRODUÇÃO

No atual momento da indústria fabril a usinagem pelo processo de fresamento é considerado o sistema de fabricação mais versátil e flexível encontrado nas indústrias de usinagem de materiais. A característica de modelar a geometria das peças, independentemente de sua complexidade, principalmente com o uso de máquinas CNC, e altas taxas de remoção de material, torna-se o processo mais utilizado no setor metal mecânico. O processo de fresamento consiste na operação de usinagem em que o material é removido por uma ferramenta giratória denominada fresa de múltiplos insertos cortantes. De forma geral parte do processo de fresamento geram superfícies planas. (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991). Cada inserto remove uma pequena quantidade de material em cada revolução do eixo onde a ferramenta é fixada, a máquina que realiza esta operação é chamada de fresadora. (AGOSTINHO et al., 2004)

A grande gama de materiais, somado às novas tendências nos processos de usinagem determinam a produtividade da indústria metal mecânica. Tendências estas que disponibilizam máquinas-ferramenta de alta tecnologia, permitindo a elevação das condições de corte, mais efetivamente das velocidades de corte e avanço e, por conseguinte o aumento da produtividade. Este aumento na taxa de produção e na qualidade das peças são variáveis que exigem, não somente pesquisa e desenvolvimento de novas máquinas e ferramentas, mas também das condições ótimas de usinagem para conseguir resultados favoráveis para a indústria. Na indústria metal mecânica alguns materiais possuem excelente usinabilidade quando se consideram fatores como vida de ferramenta, potência, força ou temperatura de corte, entre outros, onde o alumínio é um bom exemplo.

De acordo com ABAL (2016), a exportação de alumínio no Brasil no período de 2014 a 2015 ficou em torno de 450 milhões de toneladas, considerando a produção de semimanufatura/manufaturados, alumínio primário e suas ligas. As características das ligas de alumínio as tornam relevantes para aplicação na indústria aeronáutica e automobilística, principalmente as que contêm cobre, magnésio, manganês e silício, tratáveis termicamente e encruáveis. Sua aplicação na indústria metal mecânica tem também um apelo ecológico, uma vez que a redução de peso contribui para reduzir o impacto ambiental com menor consumo energético. A intensa presença das ligas de alumínio na indústria automobilística e aeronáutica faz com que a usinagem das mesmas seja uma atividade de produção muito importante. Comparada aos aços, de maneira geral, as ligas de alumínio são consideradas fáceis de usar. Porém, características e propriedades mecânicas de alguns grupos de ligas de alumínio, associados com as condições de corte, podem comprometer sua usinabilidade. Por exemplo, grupos de ligas de alumínio com alta pureza ou com alto teor de silício, tendem a apresentar altas temperaturas e forças de usinagem, acabamento superficial ruim, difícil controle do cavaco e altas taxas de desgaste e lascamentos. A usinabilidade das ligas de alumínio, portanto, está intimamente ligada às propriedades físicas e mecânicas destas ligas.

Muitos estudos têm sido conduzidos para investigar a influência de fatores e condições de corte sobre as características de usinabilidade (forças, temperatura e potência de corte; taxas de desgaste, controle do cavaco e integridade). Em todas essas pesquisas é peculiar a investigação das características de usinabilidade para uma ou duas ligas de alumínio com propriedades mecânicas distintas. Não existem, entretanto, pesquisas que relacionem a usinabilidade com uma faixa ampla de propriedades mecânicas. (CALADO, 2003).

Este trabalho pretende verificar quantitativamente como as principais variáveis do processo de fresamento frontal afetam as forças de corte e rugosidade na liga de alumínio-silício A356. O tratamento e análise dos dados foram feitos através de planejamento experimental, permitindo determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Processo de Usinagem por fresamento

O Fresamento pode ser classificado basicamente de acordo com a posição dos seus dentes ativos na fresa, sendo: fresamento cilíndrico tangencial como aquele em que os dentes ativos ou arestas cortantes estão na superfície cilíndrica da ferramenta, sendo o eixo da fresa paralelo à superfície gerada. O fresamento frontal (objetivo da pesquisa) é a operação em que as arestas cortantes estão dispostas na superfície plana de topo da ferramenta, sendo o eixo da fresa perpendicular à superfície gerada. Pode-se ainda, citar o fresamento concordante e discordante como aquele em que o sentido de rotação da fresa concorda com o sentido de avanço da mesa da fresadora, e, naturalmente, o fresamento discordante como aquele em que o sentido é inverso, sendo mais significativos quando aplicado ao fresamento cilíndrico tangencial (FERRER et al., 2003).

2.2. Fresamento frontal

O fresamento frontal simétrico é quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem e fresamento frontal assimétrico, quando o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça em usinagem, como mostrado na Fig. 2.1. Segundo Costa (2003), no fresamento frontal simétrico, o cavaco formado na primeira metade do contato entre a ferramenta e a peça tem praticamente a mesma forma do formado na segunda metade do contato, mas no fresamento assimétrico o cavaco formado na primeira metade do contato entre a ferramenta e a peça é diferente do formado na segunda metade do contato.

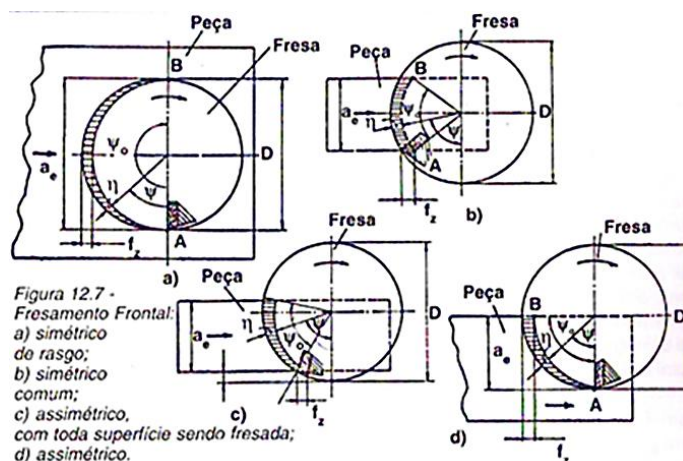


Figura 2.1. Fresamento frontal, Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

2.3. Fresamento quanto aos parâmetros de usinagem

Para uma operação de fresamento eficiente, deve se observar alguns parâmetros de corte, como a profundidade de usinagem a_p que deve ser a maior possível, o avanço (f) que depende do tipo de fresa, do material da ferramenta, do acabamento da peça e da potência da máquina e a velocidade de corte que é a principal responsável pelo desgaste e, consequentemente, a vida da ferramenta.

No fresamento, a velocidade de avanço (v_f) é a variável fundamental que define previamente o volume de material a ser removido. Neste caso, para diferentes números de arestas de corte na ferramenta correspondem diferentes avanços por dente no corte. Este fato gera diferenças na espessura de corte afetando as variáveis de resposta do processo, como forças, cavacos, desgastes, etc.

2.4. Forças e Potências de corte

Segundo Costa (2003), a seção do cavaco varia durante o percurso da ferramenta, induzindo uma dinâmica à força de corte, a qual a poderá reduzir a vida da ferramenta. Ainda, segundo Diniz *et al.* (2013), a força de usinagem, com direção e intensidade variável, é a composição das conhecidas forças ativas (força de corte e força de avanço) e força passiva (força de profundidade).

Destas somente as forças ativas consomem potência por estarem no plano de trabalho, mais outras ações como a flambagem no porta-ferramenta dependem diretamente do valor da força passiva, a qual exerce influência importante nas operações de fresamento, concordando com citações de Costa (2003), que concluiu ter a força passiva maior influência no desgaste e na força de corte, tornando-a muito importante para a vida da ferramenta.

A força de corte (F_c), como nos demais processos de usinagem, é dada pelo modelo de Kienzle, conforme mostrado a Eq. 1. A mesma é influenciada pela espessura do cavaco (h_m), indiretamente representada pelo avanço (f_z) e ângulos de posição da aresta (χ_r) e de contato do dente (ϕ_0) e também a pressão específica de corte (K_s). A influência da velocidade de corte na pressão específica de corte, nas faixas usuais de utilização, é desprezível segundo Diniz *et al.*, (2013). Assim, a potência de corte é proporcional a velocidade de corte.

$$F_c = K_s \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{Sen}(\phi_0) \quad \text{Eq.(1)}$$

Pelo exposto acima, torna-se importante avaliar o desempenho do processo de fresamento frontal do Alumínio-silício A356, através do monitoramento de variáveis de respostas do processo, como os esforços de corte, quando utilizado diferentes parâmetros de corte.

2.5. Usinabilidade do alumínio.

O alumínio possui uma combinação única de propriedades que o tornam um material de construção versátil, altamente utilizável e atrativo. Algumas das principais características deste material segundo a Associação Brasileira de Alumínio são: Leve e com baixa densidade; Alta resistência à corrosão; Alta elasticidade. Grandes vantagens podem ser citadas para promover o uso do Alumínio, mas a mais importante delas é o fato de apresentar uma excelente relação resistência-peso, mais ainda quando se combina com elementos de liga. A diminuição no peso de uma máquina ou equipamento se traduz em menores consumos de energia, daí a grande vantagem no uso deste metal para a construção de máquinas, edificações e veículos de transporte. O alumínio possui resistência à oxidação progressiva, já que os átomos da sua superfície combinam-se com o oxigênio da atmosfera, formando uma camada de óxido. Na Tabela 2.1. apresenta a classificação do alumínio normatizada pela Norma ASTM B26/B26m.

Tabela 2.1. Classificação do alumínio e suas ligas (ASTM B26/B26m)

Designação	Componente Majoritário da liga
1XXX	Nenhum
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco e Magnésio
8XXX	Outros

Machado e Da Silva (2004) citam que devido ao baixo ponto de fusão do alumínio (659°C) as temperaturas de corte são facilmente suportáveis pelas ferramentas atuais e, portanto, as velocidades de corte podem ser muito elevadas. A única limitação seria a potência e no caso extremo, a vibração excessiva da máquina. As velocidades recomendadas por eles, dependendo do material da ferramenta, são:

- Até 300 m/min para HSS
- Até 600 m/min - com metal duro e
- 4.500 m/min ou maior - com PCD

2.6. Fluidos de corte para usinagem de alumínio.

O alumínio é um material com excelente índice de usinabilidade. Segundo Machado e Da Silva (2004) o alumínio pode muitas vezes ser usinado a seco, porém as ligas de alumínio conformadas, com alto teor de cobre, requerem um fluido de corte com alta capacidade refrigerante. O ponto de fusão das ligas de alumínio está na faixa dos 650 a 700°C temperatura que pode ser atingida na interface de contato peça/cavaco/ferramenta. Daí existe a facilidade de ocorrer soldagem por fusão do alumínio à ferramenta, empastando-a (Weingaertner et al., 1991). O uso dos recursos para diminuir o atrito e refrigerar é essencial para remover o calor gerado e evitar a formação da APC.

A natureza relativamente dúctil do material produz cavacos longos que geram grandes áreas de contato cavaco-ferramenta, aumentando a força de corte e a ação lubrificante do fluido de corte tem grande participação na diminuição dessa área, facilitando o cisalhamento do material.

Os fluidos de corte mais comuns são os óleos emulsionáveis de base vegetal, mineral ou sintéticos. A concentração varia entre 1:25 e 1:50 (óleo em água), e a aplicação deve ser feita por mangueiras direcionadas para a área de corte (2/3 do jato direcionado para a peça e 1/3 para a ferramenta), com grande vazão, de modo que o fluxo não seja interrompido e que ocorra um arraste eficiente dos cavacos. Em operações de desbaste mais pesado às baixas velocidades, pode-se usar óleo mineral, aditivado com gordura animal e diluído com querosene (WEINGAERTNER et al., 1991).

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais e Máquina

Os ensaios de fresamento frontal da liga de Alumínio A356 foram realizados no laboratório de processos de fabricação por usinagem do DEMEC / UFSJ, utilizando-se de um Centro de Usinagem DISCOVERY 560, ROMI, conforme mostrado na Fig. 3.1.



Figura 3.1. Centro de Usinagem DISCOVERY 560.

Os corpos de prova foram fabricados em AlSi (A356) ($k_s = 1600 \text{ N/mm}^2$), de seção quadrada de 40 mm x 40 mm, conforme mostrado na montagem da Fig. 3.2.



Figura 3.2 Corpo de prova montado no dinamômetro.

A Figura 3.3 ilustra um sistema de monitoramento constituído de dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler 9272, com quatro canais, um amplificador de sinais Kistler 5070A e o software DynoWare, também fornecido pela Kistler. O sistema de aquisição de forças composto por estes equipamentos foi interligado com um microcomputador com processador Intel Pentium Dual Core 2.2GHz com 2GB de memória RAM.

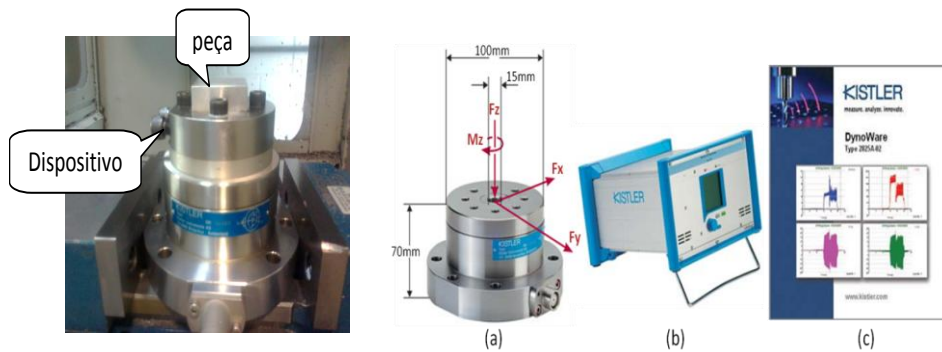


Figura 3.3. Montagem do Dinamômetro (a) Dinamômetro Kistler 9272; (b) amplificador de carga Kistler 5070A; (c) software kistler Dynoware.

A Figura 3.4 apresenta a fresa utilizada, tipo cilíndrico modelo R390-020A20-11L, com ângulo de posição 90°, com diâmetro de 20 mm e com dois insertos.



Figura 3.4. Fresa modelo R390-020A20-11L.

As pastilhas utilizadas são do código R390-11 T3 04M-KM e da classe CT530 recomendada para altas rotações no fresamento do alumínio devido a baixa tendência para formação de arestas postiças. Para os ensaios, optou-se por fatores de controle (variáveis de influência) bem como seus respectivos níveis, o avanço por dente (f_z), a penetração de trabalho (a_p), a velocidade de corte (v_c) e o meio lubro-refrigerante, os quais são apresentados Tab. 3.1. Os efeitos de cada fator, bem como os efeitos da interação entre os mesmos sobre as variáveis de resposta escolhidas serão analisados através de um Planejamento Fatorial aleatorizado por níveis e com 95% de confiança.

Tabela 3.1. Fatores de controle e níveis adotados.

Fator de Controle	Unidade	Níveis	Especificações
Avanço por dente (f_z)	mm/rot	3	0,08 – 0,12 – 0,16
Velocidade de corte (v_c)	m/min	2	500 e 600
Lubro-refrigeração		2	Emulsão 5% e 10%

As variáveis de resposta do processo de fresamento mostradas na Tab. 3.2, são a força de corte (F_c), indiretamente monitoradas pelo momento torsor (M_t) e a de avanço (F_f), assim como, os parâmetros de rugosidade média (R_a) e máxima (R_y) obtidas de um Rugosímetro SurfTest SJ-400 Mitutoyo, mostrado na Fig. 3.5.



Figura 3.5. Rugosímetro surftest SJ-400 Mitutoyo.

As forças foram monitoradas em todos os experimentos e os parâmetros de rugosidade foram medidos na região inicial e final do corpo de prova usinado (três réplicas). Em todos os experimentos foram coletadas amostras de cavacos para futura discussão dos mesmos segundo as condições de corte.

Tabelas 3.2 Variáveis de resposta para o Fresamento.

Variáveis de resposta	Unidade	Tipo
Força de avanço (F_f)	N	Quantitativa
Momento Torsor (M_t)	Nm	Quantitativa
Rugosidade média (R_a)	μm	Quantitativa
Rugosidade máxima (R_y)	μm	Quantitativa
Tipo e forma dos cavacos	-	Qualitativa

4. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.

A análise de variância (ANOVA) visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de uma variável de saída com a variação de um ou mais parâmetros do experimento, isto é, se os fatores exercem influências em alguma variável dependente. Dessa forma, permite que vários grupos sejam comparados simultaneamente a partir de um conjunto de experimentos propriamente planejado. Assim quanto maior for a média da primeira comparada à segunda, maior é a evidência de que existe variabilidade entre grupos, ou seja, médias diferentes.

Os fatores podem ser de origem qualitativa ou quantitativa e a variável dependente deverá ser necessariamente contínua. A Tabela 4.1 e 4.2 apresentam o modelo utilizado neste experimento, onde apenas três variáveis como o avanço por dente da fresa (f_z) em três níveis, a velocidade de corte (v_c) em dois níveis e a concentração de lubro-refrigerante também em dois níveis são observadas. Três réplicas em cada teste foram realizadas, isto representa um total de $(3 \times 2 \times 2 \times 3)$ 36 ensaios.

Tabela 4.1: Modelo de preparação para a realização dos ensaios

Fluido 5%											
Órden	Teste	f_z	v_f	v_c	ap	Órden	Teste	f_z	v_f	v_c	ap
1	4b	0,12	1910	500	3,58	10	5c	0,08	1528	600	4,48
2	6c	0,08	1273	500	5,37	11	3b	0,12	2292	600	2,98
3	5a	0,08	1528	600	4,48	12	4a	0,12	1910	500	3,58
4	2b	0,16	2547	500	2,69	13	2a	0,16	2547	500	2,69
5	3a	0,12	2292	600	2,98	14	3c	0,12	2292	600	2,98
6	6a	0,08	1273	500	5,37	15	2c	0,16	2547	500	2,69
7	4c	0,12	1910	500	3,58	16	5b	0,08	1528	600	4,48
8	1c	0,16	3056	600	2,24	17	1a	0,16	3056	600	2,24
9	1b	0,16	3056	600	2,24	18	6b	0,08	1273	500	5,37

Tabela 4.1: Modelo de preparação para a realização dos ensaios

Fluido 10%											
Órden	Teste	f_z	v_f	v_c	ap	Órden	Teste	f_z	v_f	v_c	ap
1	4b	0,12	1910	500	3,58	10	5c	0,08	1528	600	4,48
2	6c	0,08	1273	500	5,37	11	3b	0,12	2292	600	2,98
3	5a	0,08	1528	600	4,48	12	4a	0,12	1910	500	3,58
4	2b	0,16	2547	500	2,69	13	2a	0,16	2547	500	2,69
5	3a	0,12	2292	600	2,98	14	3c	0,12	2292	600	2,98
6	6a	0,08	1273	500	5,37	15	2c	0,16	2547	500	2,69
7	4c	0,12	1910	500	3,58	16	5b	0,08	1528	600	4,48
8	1c	0,16	3056	600	2,24	17	1a	0,16	3056	600	2,24
9	1b	0,16	3056	600	2,24	18	6b	0,08	1273	500	5,38

Na pesquisa, optou-se por manter constante o volume de material usinado de 130 cm³/min em função da variação do ajuste (ap) para cada avanço (f_z) e velocidade de corte (v_c), mantendo uma área de trabalho constante (a_e) de 19 mm², cujo cálculo de volume de material é obtido pela Eq. (2).

$$Q = v_f * ap * a_e = f_z * z * n * ap * a_e \quad \text{Eq.(2)}$$

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

A estatística abaixo foi realizada através do teste “F” e considerando o mesmo nível de significância ($\alpha = 0.05$) pode-se observar os principais efeitos. SST é a soma de quadrados total e mede a variação total nos dados. Para o caso dos SSi (v_c), SSj (f_z) e SSk (Lubro-refrigeração) é a soma de quadrados entre os níveis ou grupos e mede a variação entre grupos. No caso do SSE é a soma de quadrados dentro dos níveis ou grupos e mede a variação dentro dos grupos é por vezes designada por variação não explicada ou residual, para a coluna GL dos dados das tabelas abaixo representam os graus de liberdade das variáveis estudadas. Quando o F_0 calculado é maior que o $F_{(0,05)}$ tabelado assume-se que a variável tem influencia significativa. A Tabela 5.1 apresenta os valores encontrados para as rugosidades média e máxima durante a realização dos ensaios.

Tabela 5.1: Resultado das rugosidades de acordo com os parâmetros de corte

Fluido 5%				Fluido 10%			
Ordem	Teste	Ra	Ry	Ordem	Teste	Ra	Ry
1	4b	2,78	4,87	1	4b	2,41	2,93
2	6c	2,89	5,07	2	6c	2,99	3,53
3	5a	2,72	4,83	3	5a	3,39	3,92
4	2b	2,38	4,20	4	2b	3,64	4,10
5	3a	2,68	4,60	5	3a	4,32	4,80
6	6a	3,04	5,33	6	6a	5,09	5,67
7	4c	2,23	4,00	7	4c	5,06	5,50
8	1c	2,04	3,63	8	1c	5,42	5,82
9	1b	2,61	4,50	9	1b	6,28	6,75
10	5c	2,09	3,67	10	5c	6,44	6,83
11	3b	2,53	4,37	11	3b	7,22	7,68
12	4a	3,05	5,33	12	4a	8,10	8,67
13	2a	3,14	5,43	13	2a	8,64	9,22
14	3c	2,30	3,97	14	3c	8,57	8,98
15	2c	2,63	4,43	15	2c	9,27	9,72
16	5b	2,74	4,80	16	5b	9,88	10,40
17	1a	2,95	4,93	17	1a	10,47	10,97
18	6b	2,95	5,23	18	6b	11,05	11,62

Para o caso da rugosidade, tanto média (Ra) como máxima (Ry), pôde-se observar que não ocorreu diferença significativa dos resultados como era de se esperar para o processo de fresamento frontal devido à ação do alisamento durante a usinagem. Porém, o resultado da ANOVA na Tab. 5.2 observou-se diferença na rugosidade média e máxima

quando utilizado o meio lubro-refrigerante de 5% e 10%, sendo que o fluido com concentração de 5% apresentou menores rugosidades média e máxima. Neste caso, acredita-se ter havido maior retirada de calor do processo reduzindo a deformação plástica e consequente melhorando o acabamento superficial.

Tabela 5.2: Análise de variância para os resultados das rugosidades Ra e Ry

Rugosidade média (Ra)						Rugosidade máxima (Ry)					
SST	259,4	GL	F ₀	F _(0,05)		SST	192,2	GL	F ₀	F _(0,05)	
SSi	0,56	1	F0i	0,12	4,26	SSi	0,05	1	F0i	0,01	4,26
SSj	3,68	2	F0j	0,38	3,4	SSj	4,36	2	F0j	0,43	3,4
SSk	133,46	1	F0k	27,5	4,26	SSk	58,31	1	F0k	11,5	4,26
SSij	0,94	2	F0ij	0,1	3,4	SSij	0,42	2	F0ij	0,04	3,4
SSik	1,36	1	F0ik	0,28	4,26	SSik	3,81	1	F0ik	0,75	4,26
SSjk	1,94	2	F0jk	0,2	3,4	SSjk	2,177	2	F0jk	0,21	3,4
SSijk	1,11	2	F0ijk	0,11	3,4	SSijk	1,72	2	F0ijk	0,17	3,4
SSE	116,36	24				SSE	121,35	24			

Tabela. 5.3 apresentam os resultados encontrados das forças de avanço e o momento tursor para a lubro-refrigeração de 5 e 10 %. Neste caso foram encontrados menores valores de F_f e M_t com fluido com concentração de 5% e menores valores de M_t e F_f para velocidade de corte de 600 m/min.

Tabela 5.3: Resultado encontrado para as forças de corte no fresamento M_t e F_f

Momento tursor (M_t) Fluido 5%							Força de avanço (F_f) Fluido 5%						
f_z	500 m/min	600 m/min					f_z	500 m/min	600 m/min				
0,08	5,77	5,62	5,4	4,49	4,52	4,94	0,08	88,19	97,46	93,87	78,96	80,29	79,21
0,12	5,28	4,46	4,76	4,21	4,06	3,57	0,12	81,65	79,42	69,85	67,37	67,13	69,19
0,16	5,07	5,25	5,19	3,91	3,45	3,66	0,16	86,31	77,52	73,94	66,46	66,5	56,89
Momento tursor (M_t) Fluido 10%							Força de avanço (F_f) Fluido 10%						
f_z	500 m/min	600 m/min					f_z	500 m/min	600 m/min				
0,08	5,62	5,83	5,98	4,67	4,73	4,49	0,08	106,35	109,71	97,66	70,95	63,02	66,65
0,12	4,88	5,07	4,76	4,03	4,36	4,33	0,12	85,6	89,42	92,01	66,38	61,8	58,59
0,16	4,97	5,1	4,88	3,94	4	3,88	0,16	87,13	79,5	87,13	59,51	67,9	54,47

De acordo com o resultado da ANOVA para o momento tursor na Tab. 5.4 observou-se uma dependência não só das variáveis avanços por dente e velocidade de corte, mas também, da interação entre ambas, sendo mais expressivo, isto é, menor valor do M_t quando foi utilizado o maior valor de avanço por dente e de velocidade de corte.

Tabela 5.4: Análise de variância para as força de corte F_f e M_t

Momento tursor (M_t)						Força de avanço da ferramenta (F_f)					
SST	15,6	GL	F ₀	F _(0,05)		SST	6837,2	GL	F ₀	F _(0,05)	
SSi	9,66	1	F0i	205,1	4,26	SSi	4041,78	1	F0i	173,4	4,26
SSj	4,05	2	F0j	42,94	3,4	SSj	1386,77	2	F0j	29,75	3,4
SSk	0,1	1	F0k	2,15	4,26	SSk	15,43	1	F0k	0,66	4,26
SSij	0,37	2	F0ij	3,94	3,4	SSij	97,51	2	F0ij	2,09	3,4
SSik	0,05	1	F0ik	1,04	4,26	SSik	616,94	1	F0ik	26,47	4,26
SSjk	0,03	2	F0jk	0,32	3,4	SSjk	21,72	2	F0jk	0,47	3,43
SSijk	0,18	2	F0ijk	1,94	3,4	SSijk	97,73	2	F0ijk	2,1	3,4
SSE	1,13	24				SSE	559,345	24			

A força de avanço da fresa, Tab. 5.4, presentes nos processos de usinagem possui grande importância, pelo fato de determinarem possíveis desvios da ferramenta, sendo utilizadas no projeto de máquinas-ferramentas e também servirem como um indicativo da usinabilidade dos materiais, pois quanto maior a força empregada, mais difícil tende a ser a usinagem do material. Verificou-se que a força de avanço é dependente não só das variáveis avanços por dente e velocidade, mas também, da interação entre a velocidade de corte e o meio lubro-refrigerante, apresentando-se menor valor de F_f quando foi utilizada a maior velocidade de corte e maior concentração de fluido com 10%.

6. CONCLUSÃO

Da análise dos resultados do fresamento frontal da liga de Alumínio- Silício A356 quando utilizado ferramenta de metal duro R390-11 T3 04M-KM, classe CT530, e um mesmo volume de material usinado, pode-se concluir que:

No estudo dos parâmetros de rugosidade não existem tendências nítidas, e com boa correlação visual na qualidade das superfícies usinadas, mas é possível inferir que o meio lubrificante com menor concentração resultou em menores valores de rugosidade média e máximo e menores esforços de corte.

O aumento da velocidade de corte e do avanço por dente mostrou-se como parâmetros que influenciam na redução dos esforços de usinagem para o M_t e F_f . Sendo que o aumento de velocidade e do avanço promovem um aumento da temperatura, consequentemente uma redução na dureza do material da peça e diminuindo a força de cisalhamento do para o corte. Porém o aumento do avanço por dente combinado com o fluido de corte com concentração de 10% apresentou valores menores para a F_f .

Foi constatado que para o momento torsor a força diminui com o aumento da velocidade de corte e do avanço por dente da fresa;

A força de avanço da ferramenta depende da velocidade de corte e do estado de lubricidade da interface fresa-peça.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores da pesquisa agradecem a assistência do DEMEC / UFSJ, a FAPEMIG e o Centro Universitário UNA pelo apoio nesta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- Agostinho, O.L., Vilella, R.C. e Button, S.T., 2004, “Processos de Fabricação e Planejamento de Processos”, Processos Produtivos em Engenharia de Produção – Usinagem, UNICAMP, 2ª Ed., Campinas.
- Calado, V., Montgomery, D. C., 2003, “Planejamento de Experimentos Usando o Statistica”, E-Papers Serviços Editoriais, Rio de Janeiro, 260p.
- Costa, A. R., 2003, “Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Incertos Intercambiáveis”, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Diniz, A. E., Marcondes F. C., Coppini N. L., 2013, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, Artiliber Editora, 8ª edição, São Paulo, 261p.
- Ferrer J.A.G, A.E. Diniz, J.A.P. Arruda E J.L.R. Ribeiro, 2003, “Fresamento de Faceamento de Superfícies Interrompidas de Ferro Fundido Cinzento”, Máquinas e Metais, Aranda Editora, nº 447, p.68-89.
- Ferraresi, D., 1981, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, Vol. 1, São Paulo, 751p.
- Machado, A.R., Da Silva, M.B., 2004, “Usinagem dos Metais”, apostila, EDUFU, 8ª versão, Uberlândia, 257 p.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Editora Edgard Blucher.
- Miranda, G. W. A. Et Al, 2001, “Quando as brocas de metal duro revestidas dispensam os fluidos de corte”, O Mundo da Usinagem, ISSN 1518-6091, RG.BN 217.147, pp. 20-25.
- M. Sokovic, K. Mijanovic, 2001, “Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”, Journal of Materials Processing Technology 109, pp. 181-189.
- Weingaertner W.L.; Schroeter R.B., 1991, “Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas”, Alcan Alumínio do Brasil, 2ª ed., São Paulo.

9.0 RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ASSESSMENT OF EFFORTS IN CUTTING MILLING FRONT ALUMINUM ALLOY-SILICON(A356)WHEN KEPT CONSTANT PRODUCTION PARTS

Rodrigo da Silva Barbosa, rodrigo.s.barbosa@prof.una.br¹

Deibe Valgas dos Santos, deibe.santos@prof.una.br¹

Durval Uchôas Braga, durval@ufsj.edu.br²

Frederico Ozanan, Nevesfred@ufsj.edu.br²

¹Centro Universitário UNA; Av. Afonso Vaz de Melo, 465, Barreiro, CEP: 30640-070 Belo Horizonte - MG

²Universidade Federal de São João del-Rei / UFSJ – Praça Frei Orlando 170, Centro, CEP 36.307-352 São João del-Rei MG.

Abstract: *The development of the industrial park in the production of automotive and aircraft parts , it is observed that the milling process has proven more versatile and flexible machining of materials , especially of molds and dies . Ally features weight reduction and excellent mechanical strength , aluminum and its alloys have replaced steel and cast iron in several of these products. In this sense , it was decided to develop a survey to analyze cutting forces and surface integrity in the Aluminum - Silicon alloy face milling - A356 when used cutting coolant applied in abundance (two levels), and changed the parameters as feed per tooth (three levels) and cutting speed (two levels) , maintaining always constant the volume of usnado material, ie , the same parts production . The response variables of the milling process were the cutting force (F_c) , indirectly monitored by cutting torque (M_t) and feed force (F_f) as well as the parameters of average roughness (R_a) and maximum (R_y). As main results , we highlight that the roughness proved inversely proportional to the lubricating effect of the process . Process forces were also lower when used cutting speed and feed per tooth in higher milling . Another issue concerns the feed force that seems to be dependent on the interaction of cutting speed with cutting coolant medium, being lower for higher levels of these variables.*

Keywords: *Modular endmill , Aluminium- Silicon ; cutting force ; cutting coolant.*