

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E MICROESTRUTURA NA FORÇA DE CORTE DO TORNEAMENTO DAS LIGAS AERONÁUTICAS

Miguel Dias Júnior

Mário Cezar dos Santos Júnior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense Itaperuna – IFF – Campus Itaperuna, BR 356, km3 - Cidade Nova - Itaperuna - RJ CEP: 28300-00, Itaperuna – RJ.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES - Campus São Mateus, Rodovia BR-101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus – ES.

miguel.dias.jr@gmail.com

mcezarjr@ifes.edu.br

Resumo: Em virtude de suas excelentes características, o emprego das ligas de alumínio aumentou consideravelmente nos últimos anos, chegando a gerar 80% do volume do cavaco na indústria aeronáutica. Entender os efeitos das propriedades mecânicas e condições de corte, representa uma iniciativa para a melhora da usinabilidade dessas ligas. A força de corte (F_c) pode fornecer indícios da energia consumida para se formar o cavaco, têm uma forte relação com desgaste da ferramenta e geram dados para se melhorar o dimensionamento dos componentes das máquinas e das ferramentas de corte. Neste trabalho foram investigados os efeitos das propriedades mecânicas e das condições de corte sobre a força de corte durante o torneamento das ligas de alumínio 7075-T73 e 7075-T6. As condições de corte foram estabelecidas por meio de um planejamento fatorial 2k completo. Os níveis dos fatores foram: Liga (7075-T73, 7075-T6), V_c (200 m/min, 600 m/min), f (0,20 mm/rot; 0,35 mm/rot), ap (1 mm, 4 mm) e Lubrificação (seco, jorro). Os efeitos fatoriais foram avaliados com um nível de significância de 5%. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas, isoladamente, ou interagindo com outros fatores, tiveram significativo efeito nas respostas das componentes da força de corte (F_c).

Palavras-chave: Força de Usinagem; Usinabilidade; Torneamento; Ligas de alumínio

1. INTRODUÇÃO

Atuar competitivamente é crucial para a sobrevivência das empresas no cenário mercadológico atual (Kardec e Nascif, 2012). Atualizar-se, competitivamente, depende de que fatores estratégicos e tecnológicos estejam alinhados na busca por menores tempos de fabricação e otimização da vida de ferramentas, pois os parâmetros de corte estão intimamente ligados a maximização da produção, o que torna esta tarefa bastante complexa. (Aneiro *et al.*, 2008).

Neste sentido, este trabalho tem como principal objetivo a investigação dos efeitos das propriedades mecânicas e das condições de corte sobre a força de corte durante o torneamento das ligas de alumínio 7075-T73 e 7075-T6.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A força de usinagem, durante o processo de torneamento, depende das forças de avanço (f), passiva (f_p) e de corte (f_c), que atuam na ferramenta de corte, nas direções de avanço, ortogonal ao plano de trabalho e de corte, respectivamente (Sánchez-Carrilero *et al.*, 2002; Trent; Wright, 2000). Ela resulta da resistência ao cisalhamento do metal usinado nos planos de cisalhamento primário e secundário, que depende das áreas e das tensões de cisalhamento destes planos (Trent; Wright, 2000). Qualquer fator que altere a área dos planos de cisalhamento primário ap e do plano de cisalhamento secundário, bem como a resistência mecânica do material usinado, influenciará as tensões de cisalhamento na zona primária e secundária; e, portanto, a força de usinagem.

Segundo Weingaertner e Schroeter (1991), dentre os fatores que podem afetar as áreas e tensões nos planos de cisalhamento estão o tipo de material da peça, as condições de corte e as alterações geométricas da ferramenta de corte.

A velocidade de corte pode alterar o nível da ductilidade na região de corte, devido à sua influência sobre a temperatura nessa região, principalmente na zona de fluxo (Rao; Shin, 2001).

A resistência mecânica influenciará a tensão de escoamento, que, por sua vez, influenciará as tensões de cisalhamento nas zonas de cisalhamento.

O fluido de corte, se atuar como um refrigerante, inibindo o amaciamento do material na região de corte, poderá aumentar a resistência ao cisalhamento nessa região.

O avanço (f), a profundidade de corte (ap), a ductilidade, a inércia química (IQ), o desgaste de cratera (KT) e de flanco, a lubri-refrigeração (lub) e o ângulo de saída que afetam as áreas dos planos de cisalhamento primário, secundário e terciário (região de flanco), afetam os esforços de corte nesses planos (Machado *et al.*, 2009; Mills; Redfor, 1983).

Embora as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário sejam de difícil avaliação, a área da secção de corte contida no plano de referência, permite avaliar a tensão de compressão da força de corte, também chamada pressão específica de corte (Boothroyd, 1981).

As determinações das componentes da força de usinagem, comumente, em processos de torneamento, têm sido feitas utilizando-se dinamômetros com sensores piezelétricos (Chambers, 1996; Coelho *et al.*, 1995; Fuh; Wu, 1995; Sánchez-Carrilero *et al.*, 2002), cujos sinais são amplificados e adquiridos (Davim; Monteiro Baptista, 2000; Lin *Et Al.*, 2001; Manna; Bhattacharayya, 2002; To *et al.*, 1997) com frequência variando entre 1 kHz a 5 kHz (Braga *et al.*, 2002, List *et al.*, 2005; Rao; Shin, 2001).

Durante a usinagem das ligas de alumínio, as forças de usinagem são baixas, comparadas aos aços (Kelly; Cotterell, 2002), apresentam pressões específicas até 70% menores, contudo, essa diferença não é muito grande entre as ligas de alumínio, dependendo da composição química e das propriedades físicas das ligas (Jhone, 1994). Ações que minimizem a área de contato cavaco-ferramenta, tais como redução da ductilidade da liga, através da adição de elementos de liga (Mills; Redford, 1983), trabalho mecânico a frio e tratamentos térmicos, tendem a reduzir a força de usinagem (dos Santos *et al.*, 2003; Trent; Wright, 2000).

Chambers (1996), durante o torneamento da liga de alumínio A356, verificou que o aumento da dureza provocado pela adição de 15% SiC (reforço), provocou uma redução de 10% na força de corte, pois, provavelmente, apesar de gerar grande abrasividade, deve ter reduzido as áreas dos planos de cisalhamento, principalmente a do secundário. Embora o aumento da resistência (dureza) de uma liga possa reduzir a área de contato na interface, pode ocorrer que essa resistência promova resistência ao cisalhamento na região de corte.

Demir e Gündüz (2009), no torneamento da liga de alumínio 6061, com vários tipos de tratamentos (solubilização + envelhecimento), registraram maiores forças de corte no torneamento das ligas mais duras, para velocidades de corte entre 175 e 350 m/min; enquanto que as forças foram maiores para as ligas mais dúcteis, para velocidades de corte maiores do que 350 m/min. No primeiro intervalo, vê-se que prevaleceu a resistência do material nos planos de cisalhamento; enquanto que no segundo, prevaleceu o aumento das áreas dos planos de cisalhamento.

Fang e Wu (2005), durante torneamento (ortogonal) das ligas de alumínio 7075-T6 (sR = 531 MPa e 166 HB); 6061-T6 (sR = 262 MPa e 95 HB) e 2024-T351 (sR = 430 MPa e 120 HB), registraram aumento da força de usinagem com o aumento da dureza. Aqui, também, há indícios de preavalecimento da resistência e da dureza sobre a ductilidade e resistência ao deslizamento nos planos de cisalhamento. As condições de corte são fatores que influem grandemente a força de usinagem nas ligas de alumínio, pois afetam as áreas e as tensões de cisalhamento nos planos primário e secundário.

Independentemente do nível de resistência mecânica da liga de alumínio, normalmente, o aumento da velocidade de corte pode reduzir a força de usinagem (Mills; Redford, 1983; dos Santos *et al.*, 2003), conforme encontrado por Demir e Gündüz (2009), Fang e Wu (2005) e Manna e Bhattacharayya (2002), no torneamento da liga de alumínio 15% SiC. A diminuição da força de usinagem, com o aumento da velocidade de corte deve-se, parcialmente à redução da tensão de cisalhamento na região de corte; e parcialmente, à diminuição da área do plano de cisalhamento secundário, na proporção que a temperatura na região de corte se eleva (Diniz *et al.*, 2001; Machado *et al.*, 2009; Trent; Wright, 2000).

Hamade e Ismail (2005), em ensaios mecânicos nas ligas de alumínio 2007, 2024-O, 2024-T6 e 7075-T6, em diferentes temperaturas, mostraram que o limite de resistência ao escoamento diminuiu com a elevação da temperatura de trabalho; contudo, verificaram em ensaios de tração nas ligas de alumínio 2024-T351, 3003-O e 7039 em altas taxas de deformações, tendência de aumento da resistência do material. Isso também foi constatado por Kobayashi (2000), nos ensaios de tração na liga de alumínio 6061-T6. Yousefi e Ichida (2000), no torneamento da liga de alumínio (95,44% Al, 4,5% Mg, 0,04% Cr), constataram a redução da força de usinagem com velocidades de corte entre 30 m/s e 110 m/s, pois o aumento da taxa de deformação provocou o amaciamento do material na região de corte; porém, com velocidades de corte maiores do que 110 m/s, há indícios de grande aumento da taxa de deformação, que fez aumentar a resistência ao cisalhamento, o que tendeu a aumentar a força de usinagem. Diniz, Marcondes e Copinni (2008), afirmam que em altas velocidades de corte a pressão específica de corte K_s sofre uma pequena influência em seu aumento, tornando a velocidade de corte diretamente proporcional a potência de corte.

Também Sreejith (2008), durante torneamento da liga de alumínio 6061, constatou aumento da força de corte com o aumento da velocidade de corte, o que pode estar associado ao excessivo aumento da taxa de deformação, mas foi verificado intenso processo adesivo nas superfícies de saída e de folga, que deve ter superado a ação de amaciamento do material usinado, com aumento da temperatura na região de corte.

O avanço, a profundidade de corte, a lubri-refrigeração, o ângulo de saída, o raio da ponta da cunha de corte da ferramenta, o desgaste de flanco e a aresta postiça de corte, por alterarem as áreas dos planos de cisalhamento, exercem grandes influências sobre a força de usinagem das ligas de alumínio, pois alteram as tensões de cisalhamento nos planos primário e secundário.

Zaghibani e Songmene (2009), durante simulações (elementos finitos) no fresamento da liga de alumínio 7075-T6, registraram as reduções das tensões nos planos de cisalhamento, com o aumento do avanço de corte, pois ocorreram as redistribuições dos esforços de corte ao longo destes planos. Além disso, verificaram que a tensão de cisalhamento no plano secundário foi cerca de 30% menor do que no plano primário, devido a sua maior temperatura, em virtude de suas altas taxas de deformação, que causou um amaciamento do material neste plano.

Fang e Wu (2005), durante o torneamento ortogonal das ligas de alumínio 7075-T6, 6061-T6 e 2024-T351, registraram o aumento da força de usinagem com o simultâneo aumento do avanço e da profundidade de corte. Isso também foi registrado por Fuh e Chang (1997), nos fresamentos das ligas de alumínio 5052-O, 6061-T4, 6061-T6, 2024-T351 e 7075-T351; e por Manna e Bhattacharayya (2002), durante o torneamento do Al-puro reforçado (15% SiC). Zaghbani e Somgmene (2009), durante o fresamento das ligas de alumínio 6061-T6 e 7075-T6, registraram aumento da força de usinagem com o aumento do avanço; todavia, a força de usinagem foi maior na usinagem da liga de maior dureza (7075-T6), o que concorda com Trent e Wright (2000). Sreejith (2008), no torneamento da liga de alumínio 6061, constatou a redução da força de usinagem, com a presença de fluido de corte (jorro e MQF: Mínima Quantidade de Fluido), devido à redução da adesividade da região de corte.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Usinagem conduzida no torno CNC (Multiplic 35D (Romi S.A.). A condição de mínima quantidade de fluido (MQF) foi realizada com fluido de corte biodegradável (ITW Rocol North America, 2010) com dois bicos flexíveis direcionados à região de corte, através do dispositivo dosador Accu-lube (ITW Rocol North America), com vazão de óleo 100 ± 3 ml/h, em fluxo de ar, com 6 ± 1 bar de pressão. A condição jorro foi realizada com óleo miscível em água (Vasco 1000 - Blaser Swisslube), vazão de 360 L/h, concentração de 6% (verificada com refratômetro Atago). Ferramenta de corte WC-Co: Mitsubishi: TCGT16T308-AZ HTi10, superfície de corte polida ondulada e com conjunto suporte (ISO STGCR2020K16Z) e ferramenta com ângulo de saída de 8° , de folga de 11° e de posição de 90° .

3.1. Materiais, ferramentas e consumíveis

Foi utilizado como material para os testes de usinagem (torneamento), as barras de ligas de alumínio 7075-T73-O e 7075-T6 (extrudadas $\varnothing 100 \times 500$ mm), manufaturados pela Alcoa S.A. As ligas são da série 7XXXX (Al-Zn-Mg) e são tratadas termicamente (Budd, 1999; Cerri; Evangelista, 1999) e, em virtude da presença do Zn e Mg, pode ocorrer, principalmente, a precipitação do $MgZn_2$, grande responsável pelo aumento de resistência e boa usinabilidade destas ligas (HATCH, 1984); mas, também, devido a elementos secundários, tais como, Cu, Cr, Zr, Mn, Fe e Si, podem ocorrer precipitações de fases do tipo: Al_7Cu_2Fe , $Cr_2Mg_3Al_{18}$, $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ e Al_3Zr . O zinco, isoladamente, torna as ligas suscetíveis à fratura a quente, e à fratura por corrosão; contudo, na proporção de 3% a 7,5%, combinado com o Mg, forma os precipitados $MgZn_2$, com grande resposta ao tratamento térmico - gerando-se, assim, uma liga de grande resistência mecânica. No tratamento térmico T6, a liga é solubilizada e envelhecida artificialmente; no T7, é solubilizada e estabilizada (superenvelhecida). (Degarmo *et al.*, 2002).

As ligas da série 7XXXX (Al-Zn-Mg) são tratadas termicamente (Budd, 1999; Cerri; Evangelista, 1999) e, em virtude da presença do Zn e Mg, pode ocorrer, principalmente, a precipitação do $MgZn_2$, grande responsável pelo aumento de resistência e boa usinabilidade destas ligas (Hatch, 1984); mas, também, devido a elementos secundários, tais como, Cu, Cr, Zr, Mn, Fe e Si, podem ocorrer precipitações de fases do tipo: Al_7Cu_2Fe , $Cr_2Mg_3Al_{18}$, $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ e Al_3Zr . O Zinco na proporção de 3% a 7,5%, combinado com o Mg, forma os precipitados $MgZn_2$, com grande resposta ao tratamento térmico - gerando-se, assim, uma liga de grande resistência mecânica. No tratamento térmico T6, a liga é solubilizada e envelhecida artificialmente; no T7, é solubilizada e estabilizada (superenvelhecida). (Degarmo *et al.*, 2002), conforme Fig. 1.

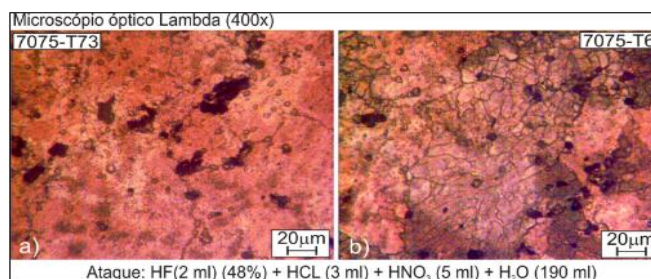


Figura 1. Microestrutura das ligas de alumínio.

A Figura 2 apresenta a variação da resistência mecânica das ligas.

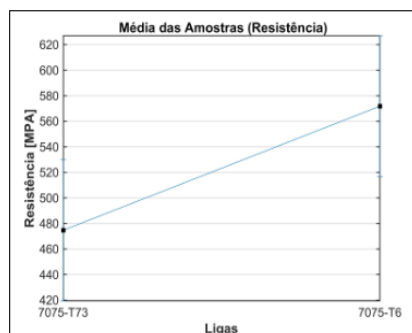


Figura 2. Resistência Mecânica das ligas.

3.2. Dispositivos de Aquisição de Sinais de Força/Configuração

A força de corte (F_c) foi mensurada usando-se um dinamômetro piezelétrico (Kistler Instruments AG, modelo 9441B), montado conforme mostra a Fig. 3. Os sinais de força foram adquiridos a uma taxa de aquisição de 1kHz, através de uma placa de aquisição de dados (NI-6251) e um programa LabviewTM, ambos da National Instruments.

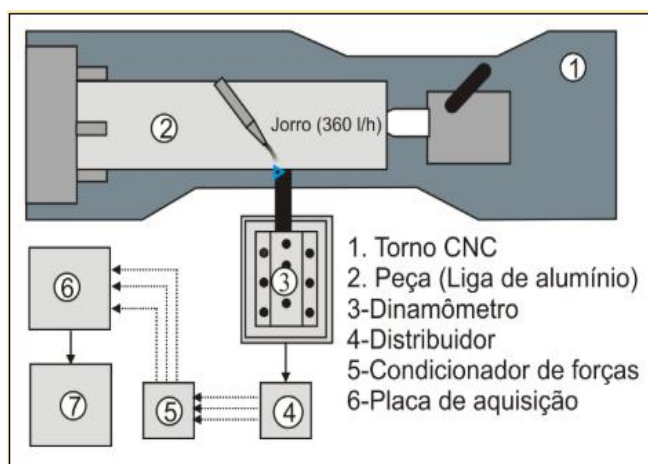


Figura 3. Configuração para medição das forças e potência de corte.

3.3. Planejamento Fatorial 2^k

Para se entender a influência dos parâmetros (V_c , f , a_p , Lub e Liga) sobre as componentes da força de corte (F_c), utilizou-se o planejamento fatorial de experimento 2^k completo, com uma repetição ($n = 2$). O critério adotado para se identificar os parâmetros que influenciavam significativamente as respostas - foi o p-nível de cada fonte variação e a análise gráfica dos efeitos (mudança na resposta média, produzida por uma mudança no nível do fator). Fontes de variação com p-nível menores do que 5% foram consideradas influentes sobre as respostas. Os níveis baixos (-1) e altos (+1) dos fatores do planejamento fatorial 2^k , foram: Liga (7075-T73, 7075-T6), V_c (200 m/min, 600 m/min); f (0,2 mm/rot, 0,35 mm/rot); a_p (1 mm, 4 mm) e Lub (seco, jorro), portanto com $k = 5$. Para cada tratamento foram geradas duas amostras de 5000 observações, cada. A análise estatística dos efeitos principais e interações foi feita utilizando-se software Estatística 7.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A velocidade de corte (V_c) influenciou significativamente a força de corte, uma vez que conforme as altas faixas trabalhadas (200 m/min. e 600 m/min.), minimizam o surgimento da aresta postiça de corte (APC) que poderia reduzir a força de usinagem. Esta faixa de configuração de velocidade de corte atuou de forma diretamente proporcional à força de corte e consequentemente à potência de corte, Tab. 1.

Tabela 1. Significância dos Coeficientes do Modelo de Força de Corte.

Fontes	Coef.	SCoef.	Efeito	pval	Est.t
Vc	-29.28	3.27	-58.57	8.98E-09	-8.93
ap	333.18	3.27	666.36	6.70E-31	101.65
f	119.05	3.27	238.11	3.91E-21	36.32
Ligas x Vc	6.05	3.27	12.10	0.07823	1.846
Ligas x ap	-9.99	3.27	-19.99	0.0058	-3.05
Ligas x f	9.75	3.27	19.50	0.0069	2.97
Vc x ap	-18.74	3.27	-37.48	9.44E-06	-5.71
Vc x f	-12.40	3.27	-24.80	0.0010	-3.78
ap x f	72.71	3.27	145.43	1.51E-16	22.18

O avanço (f) foi o que apresentou a segunda maior influência dentre os fatores individuais. Sua influência na força de corte é significativa, uma vez que o aumento do avanço leva ao aumento da espessura do cavaco e portanto, levando ao aumento da potência de corte, uma vez que o aumento da espessura do cavaco está diretamente ligado ao aumento da deformação do material sofrida na zona de cisalhamento primário, conforme Fig. 4.

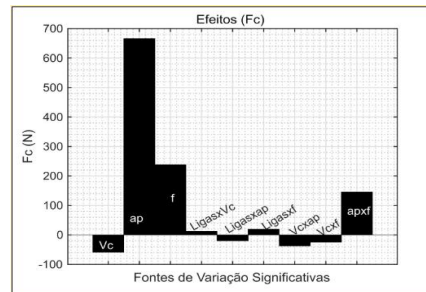


Figura 4. Efeitos fontes significativas sobre a força de corte (Fc).

A interação entre a profundidade de corte (ap) e o avanço (f), teve a maior significância no aumento da força corte dentre as interações, uma vez que o aumento destes dois fatores aumenta a área da seção de corte, elevando as áreas das zonas de cisalhamento primário e secundário, levando sucessivamente ao aumento da potência de corte.

O efeito da profundidade de corte (ap) com o avanço (f) já é algo esperado, uma vez que seu aumento eleva a força de usinagem, pois aumenta a área de seção de corte.

Dentre os efeitos em interação, o que teve a segunda maior significância, foi a velocidade de corte (Vc) com a profundidade de corte (ap). Esta interação é justificável, uma vez que velocidade de corte, em configurações altas, tende a aumentar a potência de corte, e o aumento da profundidade de corte aumenta a largura de corte, o que também influencia no aumento da potência de corte.

A Figura 5 mostra distribuição dos resíduos do força de corte em função do valor previsto, onde pode-se ver que os resíduos estão aleatoriamente distribuído em torno do valor nulo, o que caracteriza a adequabilidade do modelo da força de corte para o estudo de análise de significância.

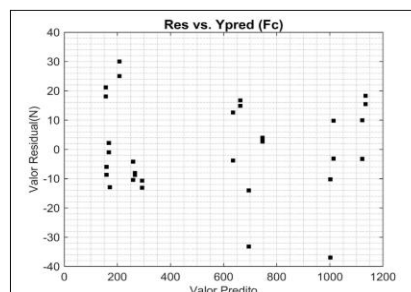


Figura 5. Resíduos vs valor predito para força de corte (Fc).

A Figura 6 compara os valores previstos do modelo de regressão da força de corte com os valores observados, onde observa-se grande proximidade dos valores para cada tratamento, o que confirma os resultados obtidos na Figura 4.

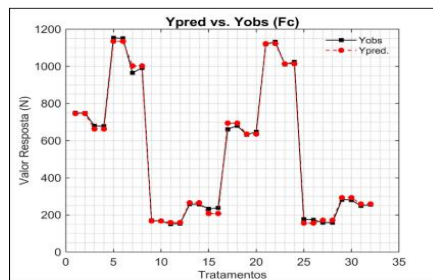


Figura 6. Valor previsto vs observado para tratamentos da força de corte (F_c).

4.1. Análise de Efeitos Fatoriais sobre a Força de Corte

A Figura 7 apresenta as médias marginais da força de corte (F_c) em função da profundidade de corte (ap), com base no estudo do contraste.

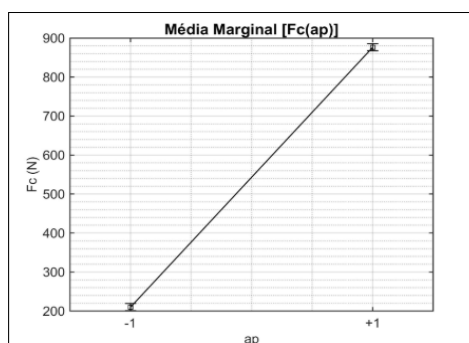


Figura 7. Variação da força de corte (F_c) em função da profundidade de corte (ap).

Essa elevação ocorre devido ao aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, que podem dificultar que a força de corte (F_c) gere a tensão necessária para superar o limite de escoamento/resistência do material. Associado a isso, se o aumento das áreas dos planos de cisalhamento favorecerem a dissipação do calor, não ocorrerá amaciamento do material na região de corte, o que também dificultará seu cisalhamento. Semelhantemente ocorre para a relação da força de corte em contraste com o avanço de corte (f) (Fig. 8), uma vez que o aumento do avanço contribui para o aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário.

A Figura 8 apresenta a variação da resposta média da força de corte (F_c) em função da variação do avanço ($f = 0,2$ mm/rot $\rightarrow 0,35$ mm/rot).

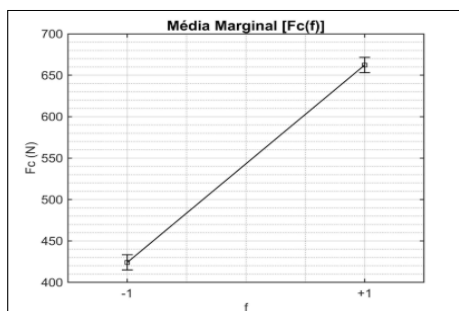


Figura 8. Variação da força de corte (F_c) em função do avanço (f).

A Figura 9 apresenta a variação da resposta média da força de corte (F_c) em função da velocidade de corte ($V_c = 200$ m/min $0,2$ mm/rot $\rightarrow 600$ m/min $0,35$ mm/rot). Essa diminuição ocorre devido ao amaciamento do material na região de corte, relacionado ao aumento da taxa de deformação que elevou a temperatura na região de corte. Isso representa o efeito benéfico do aumento da velocidade de corte (V_c) sobre a força de corte (F_c), consequentemente sobre a redução do consumo energético para se formar o cavaco, desde que o aumento de temperatura na região de corte não afete a forma original da aresta de corte por algum tipo de desgaste da ferramenta.

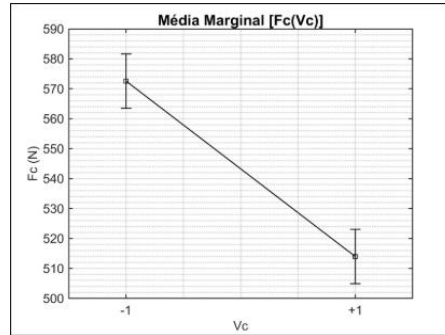


Figura 9. Variação da força de corte (F_c) em função da velocidade de corte (V_c).

A Figura 10 apresenta o efeito da interação da profundidade de corte (a_p) e do avanço (f) sobre a força de corte (F_c), onde observa-se que um aumento da profundidade de corte ($a_p = 1 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ mm}$) no nível baixo do avanço ($f = 0,2 \text{ mm/rot}$) provoca um aumento da força de corte (F_c), mas a variação conjunta da profundidade de corte ($a_p = 1 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ mm}$) com avanço ($f = 0,2 \text{ mm/rot} \rightarrow 0,35 \text{ mm/rot}$), gera uma significativa distorção da superfície de resposta, causando um excessivo aumento da força de corte (F_c). Isso deve-se ao significativo aumento das áreas dos planos de cisalhamento, elevando a resistência mecânica na região de corte, com possível aumento da dissipação do calor na região de corte que evitou o amaciamento do material.

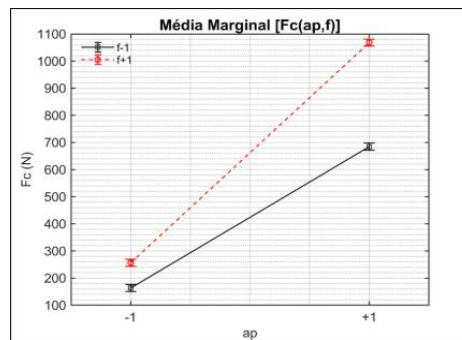


Figura 10- Variação da força de corte (F_c) em função da profundidade de corte (a_p) e do avanço (f).

Analogamente ao ocorrido nas situações da Fig. 8 e Fig. 10, ocorre para a força de corte (F_c) em função de (a_p) e (ligas), Fig. 11, uma vez que o aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário contribuíram para a maior dissipação de calor, tornando o material mais resistente ao cisalhamento.

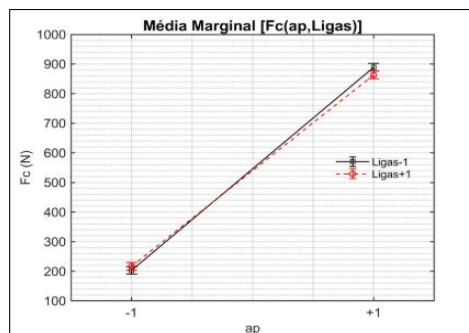


Figura 11. Variação da força de corte (F_c) da profundidade de corte (a_p) e da resistência da liga (Ligas).

A Figura 12 apresenta o efeito da interação da resistência das ligas (Ligas) e do avanço (f) sobre a força de corte (F_c), onde observa-se que um aumento do avanço ($f = 0,2 \text{ mm/rot} \rightarrow 0,35 \text{ mm/rot}$) provoca um aumento da força de corte (F_c), mas a variação conjunta do aumento do avanço com o aumento da resistência da liga ($R_m = 467 \text{ MPa} \rightarrow 560 \text{ MPa}$), gera leve distorção da superfície de resposta, causando um aumento da força de corte (F_c). Isso deve-se ao fato que um aumento das áreas dos planos de cisalhamento, com o aumento da resistência da liga, dificulta o cisalhamento na região de corte, levando ao aumento da dissipação do calor na região de corte, o que evitou o amaciamento do material.

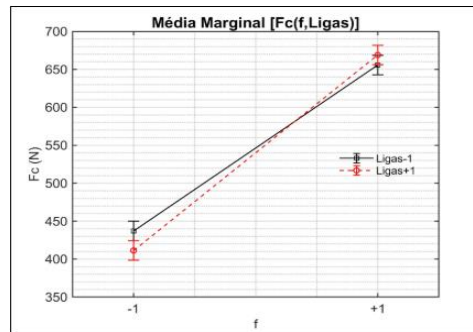


Figura 12. Variação da força de corte (Fc) em função do avanço (f) e da resistência da liga (Liga).

A Figura 13 apresenta o efeito da interação da resistência das ligas (Ligas) e da velocidade de corte (Vc) sobre a força de corte (Fc), onde observa-se que um aumento do avanço ($V_c = 200 \text{ m/min} \rightarrow 600 \text{ m/min}$), independente da resistência da liga, provoca uma redução da força de corte (Fc), mas a variação conjunta do aumento da velocidade de corte com o aumento da resistência da liga ($R_m = 467 \text{ MPa} \rightarrow 560 \text{ MPa}$), tende a elevar levemente a Força de Corte (Fc). Possivelmente, embora o aumento da velocidade corte tende a provocar um amaciamento do material em função da elevação da temperatura, ao aumento da taxa de deformação possa ter aumentado a reação de resistência ao corte, semelhante ao que acontece em teste de tração com alta taxa de deformação.

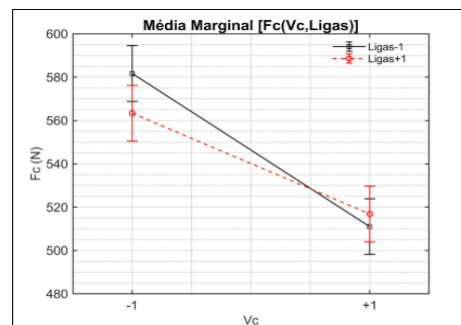


Figura 13. Variação da força de corte (Fc) em função da velocidade de corte (Vc) e da resistência da liga (Liga).

A Figura 14 apresenta o efeito da interação da profundidade de corte (ap) e da velocidade de corte (Vc) sobre a força de corte (Fc). Observa-se que um aumento da profundidade de corte ($a_p = 1 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ mm}$) no nível baixo da velocidade de corte ($V_c = 200 \text{ m/min}$) provoca um aumento da força de corte (Fc), mas a variação conjunta da profundidade de corte ($a_p = 1 \text{ mm} \rightarrow 4 \text{ mm}$) com a velocidade de corte ($V_c = 200 \text{ m/min} \rightarrow 600 \text{ m/min}$), gera uma significativa distorção da superfície de resposta, causando uma significativa redução da força de corte (Fc). Isso deve-se ao efeito de amaciamento do material com ao aumento da taxa de deformação, devido a velocidade de corte. Mas há uma indicação que o efeito do aumento das áreas dos planos de cisalhamento, não foi muito significativo para dissipação de calor, mas sim para o aumento da resistência mecânica, fazendo que o trabalho de corte do cavaco na região de corte fosse convertido em calor, o que colaborou também para o amaciamento do material na região de corte.

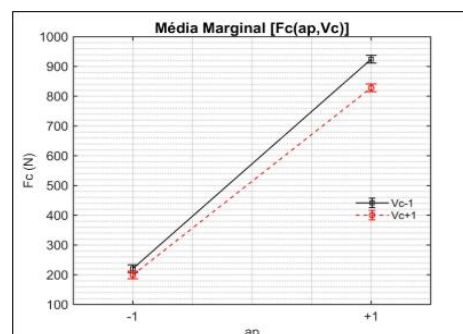


Figura 14. Variação da força de corte (Fc) em função da profundidade de corte (ap) e da velocidade de corte (Vc).

A Figura 15 apresenta o efeito da interação do avanço de corte (f) e da velocidade de corte (V_c) sobre a força de corte (F_c). Observa-se que um aumento do avanço ($f = 0,20 \text{ mm/rot} \rightarrow 0,35 \text{ mm/rot}$) no nível baixo da velocidade de corte ($V_c = 200 \text{ m/min}$), provoca um aumento da força de corte (F_c), mas a variação conjunta do avanço ($f = 0,20 \text{ mm/rot} \rightarrow 0,35 \text{ mm/rot}$) com a velocidade de corte ($V_c = 200 \text{ m/min} \rightarrow 600 \text{ m/min}$), gera uma significativa distorção da superfície de resposta, causando uma significativa redução da força de corte (F_c), semelhante ao que ocorreu na Figura 14.

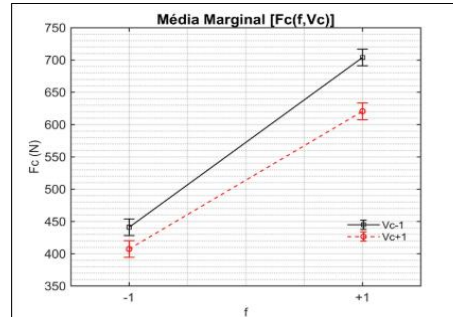


Figura 15. Variação da força de corte (F_c) em função do avanço (f) e da velocidade de corte (V_c).

5. CONCLUSÕES

Chegou-se às seguintes conclusões através da utilização de ANOVA para a saída de força de corte F_c .

- A profundidade de corte (ap) foi o fator que mais impactou no aumento da força de corte (F_c), alcançando um valor médio próximo de 900 N. Seu efeito foi diretamente proporcional, apresentando um aumento de aproximadamente 350% do nível baixo (-1) de 1 mm para o nível alto (+1) de 4 mm.
- O avanço de corte (f) foi o segundo fator que mais contribuiu para o aumento da força de corte (F_c), tendo também seu aumento diretamente proporcional a força de corte (F_c), apresentando um aumento de aproximadamente 53% do nível baixo (-1) de 0,2 mm para o nível alto (+1) de 0,35 mm.
- A velocidade de corte (vc) teve seu efeito inversamente proporcional a força de corte (F_c), apresentando um valor médio próximo de 520 N no nível alto (+1) de 600 m/min e média de aproximadamente de 570 N no nível baixo com 200 m/min, proporção de redução cerca de quase 9% na força de corte (F_c).
- A profundidade de corte (ap) em interação com a velocidade de corte (V_c) apresentou uma significância diretamente proporcional ao aumento da força de corte (F_c). Os valores médios de força de corte (F_c) mantiveram-se próximos de 200 N para os níveis baixos (-1) de profundidade de corte, independentemente do nível da velocidade de corte. Já para o nível baixo (+1) da velocidade de corte em interação com o nível alto (+1) de profundidade de corte, a força de corte (F_c) média foi de aproximadamente 900 N. Para a interação dos níveis altos de velocidade de corte e profundidade de corte, o valor médio da força de corte foi de aproximadamente 800 N, a proporção de redução da força de corte (F_c) foi de aproximadamente 11%.
- A interação entre o avanço (f) e a profundidade de corte (V_c) teve um efeito diretamente proporcional a força de corte F_c . Os valores médios próximos de 440 N para os níveis baixos (-1) de avanço e velocidade de corte e 410 N para o nível baixo (-1) de avanço e alto (+1) de velocidade de corte (redução superior a 6%). Para os níveis altos de avanço (+1) em interação com o nível baixo (-1) de velocidade de corte, o valor médio da força de corte (F_c) foi de aproximadamente 700 N. Já para os níveis altos (+1) de avanço e velocidade de corte, os valores médios da força de corte (F_c) foram próximos de 600N, redução superior a 14%.

6. AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar seus sinceros agradecimentos a Capes, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro e ao LEPU pelo fornecimento dos recursos tecnológicos para execução desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Aneiro, F. M., Coelho, R. T., Brandão, L. C. Turning Hardened Steel Using Coated Carbide at High Cutting Speed. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. XXX, N°2/109, 2008.
- Arumugam, P.U., Malshe, A.P. and Batze, S.A., 2006, "Dry Machining of Aluminum-Silicon Alloy Using Polished CVD Diamond-Coated Cutting Tools Inserts", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, No. 11, pp. 3399-3403.
- Castro, G., Almeida, F.A., Oliveira, F.J., Fernandes, A.J.S., Sacramento J. and Silva, R.F., 2008, "Dry Machining of silicon-Aluminium Alloys With CVD Diamond Brazed and Directly Coated Si3N4 Ceramic Tools", *Vacuum*, Vol. No. 82, p.1407-1410.
- Chambers. A.R., 1995, "The Machinability of Light Alloy MMCs", *Composites Part A*, Vol. 27A, No. 2, pp. 143 - 147.

- Davis, J.R., 1993, *Aluminum and aluminum alloys*, ASM International, USA.
- Degarmo, P. E.; Black, J. T.; Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*. 9. ed. Hardcover: Wiley, 2002.
- Demir, H. and Gündüz, S., 2009, "The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminium Alloy", *Journal Materials and Design*, Vol. 30, No. 5, pp. 1480-1483.
- Diniz, A. E., Marcondes, F.C. and Coppini, N.L., 2001, *Tecnologia da Usinagem dos Metais*, 3 Ed. Artliber, São Paulo.
- Fang, N. and Wu, Q., 2005, "The Effects of Chamfered and Honed Tool Edge Geometry in Machining of Three Aluminium Alloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 10, pp. 1178 - 1187.
- Fuh, K. and Chang, H., 1997, "An Accuracy Model for the Peripheral Milling of Aluminum Alloys Using Response Surface Design", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72, No. 1, pp. 42-47.
- Hamade, R.F. and Ismail, F.A., 2005, "Case for Aggressive Drilling of Aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 1, pp.86-97.
- Jhone, P., 1994, *Machining of Products*, European Aluminium Association, Düsseldorf.
- Kannan, S. and Kishawy, H.A., 2008, "Tribological Aspects of Machining Aluminum Metal Matrix Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1-3, pp. 399-406.
- KARDEC, A., NASCIF, J. *Manutenção: função estratégica*. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobras, 2009.584 páginas.
- Keong Ng, C., Melkote, S.N., Rahman, M. and Kumar, A.S., 2006, "Experimental Study of Micro- and Nano-Scale Cutting of Aluminum 7075-T6", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 9, pp. 929 - 936..
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. and Da Silva, M.B., 2009, *Teoria da Usinagem dos Materiais*, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.
- Manna, A. and Bhattacharyya, B., 2002, "A Study on Different Tooling Systems During Machining of Al/SiC-MMC", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, No. 3, pp. 476 - 482.
- Mills, B. and Redord, A.H., 1983, *Machinability of Engineering Materials*, Ed. Applied Science Publishers, London.
- Roy, P., Sarangi, S.K., Ghosh, A. and Chattopadhyay, A.K., 2009, "Machinability Study of Pure Aluminium and Al-12% Si Alloys Against Uncoated and Coated Carbide Inserts", *International Journal of Refractory Metals & Hard Material*", Vol. 27, No. 3, pp.535 - 544.
- Santos et al., 2003, *Usinagem em Altíssimas Velocidades: Como Os Conceitos HSM/HSC Podem Revolucionar A Indústria Metal-Mecânica*, Ed. Érica, São Paulo, Brazil.
- Shankar, M.R., Chandrasekar, S., Compton, W.D. and King, A. H., 2005, "Characteristics of Aluminum 6061-T6 Deformed to Large Plastic Strains by Machining", *Materials Science and Engineering*, Vol. 410-411, No. 25, pp.364-368.
- Sreejith, P.S., 2008, "Machining of 6061 Aluminum Alloy With MQL, Dry and Flooded Lubricant Conditions", *Materials Letters*, Vol. 62, No. 2, pp. 276 - 278.
- Tang, Z.T., Liu, Z.Q., Pan, Y.Z., Wan, Y. and Ai, X., 2009, "The Influence of Tool Flank Wear on Residual Stresses Induced by Milling Aluminum Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4502-4508.
- Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000, *Metal Cutting*, 4th Ed. Butterworth Heinemann, Boston, 439 p.
- Yousefi, R. and Ichida, Y., 2000, "A Study on Ultra- High-Speed Cutting of Aluminium Alloy: Formation of Welded Metal on the Secondary Cutting Edge of the Tool and its Effects on the Quality of Finished Surface", *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol. 24, No. 4, pp. 371 - 376.
- Zaghibani, I. and Songmene, V., 2009, "A Force-Temperature Model Including a Constitutive Law for Dry High Speed Milling of Aluminium Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 5, pp. 2532 - 2544.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS AND MICRO-STRUCTURE IN THE AERONAUTICAL ALLOY TURNING CUTTING FORCE

Miguel Dias Júnior

Mário Cezar dos Santos Júnior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense Itaperuna – IFF – Campus Itaperuna, BR 356, km3 - Cidade Nova - Itaperuna - RJ CEP: 28300-00, Itaperuna – RJ.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES - Campus São Mateus, Rodovia BR-101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus – ES.
miguel.dias.jr@gmail.com
mcezarjr@ifes.edu.br

Abstract. In recente years, due to its excellent characteristics, the use of aluminum alloys has increased considerably, accounting for 80% of the chip volume in the aeronautical industry. Understanding the effects of mechanical properties and cutting conditions represents an initiative to improve the machinability of these alloys. The cutting force (F_c) can provide evidence of the energy consumed to form the chip, have a strong relationship with tool wear, and generate data to improve the sizing of machine components and cutting tools. In this work the effects of the mechanical properties and the cutting conditions on the cutting force during the turning of the 7075-T73 and 7075-T6 aluminum alloys were investigated. The cutting conditions were established through a complete 2^k factorial design. The levels of the factors were: Alloy (7075-T73, 7075-T6), V_c (200 m / min, 600 m / min), f (0.20 mm / mm, 4 mm) and Lubrication (dry, jet). The factorial effects were evaluated with a level of 5% of significance. The results showed that the mechanical properties, alone or interacting with other factors, had a significant effect on the response of cutting force components (F_c).

Keywords: *Cutting force, Machinability, Turning, Aluminum alloys.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.
he printed material included in this paper.