Controle das Forças de Usinagem em Fresamento de Topo

REVISTA ELETRÔNICA MULTIDISCIPLINAR
UNIFACEAR

Fernando Suchecki; Daniel Leonidas Szableski; Fábio Antônio da Silva Conceição; Edson Daniel Banak Varela
UNIFACEAR - Centro Universitário

RESUMO

Dentre os processos de usinagem, o fresamento é um dos mais comuns e mais utilizados, pois permite realizar diversas operações em uma determinada peça. O faceamento é um dos diversos processos de fresamento, que pode ser CNC ou convencional, utilizado para desbastar, dar acabamento ou realizar alguma geometria na peça. Nos últimos tempos, pequenas empresas, artesãos e entusiastas estão criando e montando suas próprias fresadoras CNC, denominadas hobby, na maioria das vezes de baixo custo. O grande problema desses equipamentos é a falta de dimensionamento dos componentes, ou seja, não se sabe quais são os limites mecânicos da máquina. Além disso, diversos outros problemas podem surgir, como quebra precoce de ferramentas, aquecimento e até queima dos motores por excesso de carga. Uma das formas de medir a força de usinagem é através de uma célula de carga, devidamente posicionada no equipamento. O presente trabalho propõe um estudo de forças atuantes no eixo Z durante o processo de faceamento de uma fresadora CNC hobby, desenvolvida pelos autores durante a trajetória acadêmica, utilizando variações nos parâmetros de rotação da ferramenta, velocidade de avanço e profundidade de corte, com monitoramento da temperatura do motor do eixo Y. Além disso, a análise baseia-se nos valores obtidos para três materiais diferentes: alumínio 6351 T6, cobre eletrolítico e latão liga 360. Para todos os materiais, a profundidade de corte foi o parâmetro de maior influência na força de usinagem. Com a variação dos materiais, observou-se forças absolutas diferentes durante os ensaios, porém com comportamentos similares quando há alteração nos valores dos parâmetros.

Palavras-chave: Força de usinagem. Fresamento CNC. Faceamento.

ABSTRACT

Among the machining processes, milling is one of the most common and most used, as it allows you to perform several operations on a given part. Facing is one of several milling processes, which can be CNC or conventional, used for roughing, finishing or performing some geometry on the part. In recent times, small companies, artisans and enthusiasts are creating and assembling their own CNC milling machines, called hobby, most often at low cost. The big problem with this equipment is the lack of dimensioning of the components, that is, it is not known what the mechanical limits of the machine are. In addition, several other problems can arise, such as premature tool breakage, heating and even burning the engines due to excess load. One way to measure the machining force is through a load cell, properly positioned on the equipment. The present work proposes a study of forces acting on the Z axis during the faceting process of a hobby CNC milling machine, developed by the authors during the academic trajectory, using variations in the parameters of tool rotation, feed speed and depth of cut, with monitoring of the Y-axis motor temperature. In addition, the analysis is based on the values obtained for three different materials: aluminum 6351 T6, electrolytic copper and brass alloy 360. For all materials, the depth of cut was the parameter of greatest influence in the machining force. With the variation of the materials, different absolute forces were observed during the tests, but with similar behaviors when there was a change in the parameter values.

Keywords: Machining force. CNC milling. Facing.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Ferraresi (1970), o fresamento é um processo mecânico de usinagem com objetivo de obter superfícies quaisquer utilizando ferramentas multicortantes. Para esse propósito, são utilizadas as máquinas fresadoras, onde a ferramenta exerce movimento de rotação, podendo a peça ou a ferramenta se deslocar de acordo com a trajetória definida. As fresadoras são largamente utilizadas no meio industrial, possuindo deslocamento em no mínimo 3 eixos.

Apesar de serem extremamente úteis nas indústrias, um modelo comercial de fresadora CNC possui um preço relativamente alto. Uma fresadora ferramenteira convencional custa em torno de R$40.000,00 (MERCADO LIVRE, 2019). Há disponível no mercado alguns modelos de fresadoras denominadas "*hobby", que* custam aproximadamente R$10.000,00 (MERCADO LIVRE, 2019), sendo que esses modelos não são tão robustos quanto uma convencional, mas podem ser aplicadas em diversas situações. Também há as fresadoras CNC com comandos em Arduino, que podem ser adquiridas por aproximadamente R$6.000,00 (MERCADO LIVRE, 2019). Adquirir uma máquina fresadora pelos valores mencionados pode ser inviável para pequenos empresários, pequenas oficinas, artesãos, marceneiros, entre outros. Diante da necessidade de produzir componentes oriundos desse tipo de máquinas, estes recorrem a empresas que prestam o serviço.

Entretanto, tem-se popularizado durante os últimos tempos, a fabricação própria de fresadoras CNC*,* utilizando programação em Arduino. De tal maneira que pessoas com um pequeno conhecimento técnico em mecânica, elétrica e eletrônica são capazes de realizar a montagem de suas próprias fresadoras nessas condições. Com o correto dimensionamento dos motores de uma fresadora, é possível evitar diversos problemas. Pode-se especificar quais tipos de materiais é possível usinar. Nessas condições, os motores não ficarão subdimensionados ou superdimensionados. De acordo com Carvalho (2015), os estudos relacionados a força de corte são utilizados para otimizar os processos de usinagem. Ainda, através desse parâmetro, é possível prever diversas variáveis, como o comportamento da ferramenta e seu desgaste, visando evitar quebras.

2. DESENVOLVIMENTO

Ferraresi (1970) diz que o estudo e conhecimento das forças de usinagem possui aplicação em diversas áreas, como dimensionamento da estrutura e dos acionamentos das máquinas, definição do rendimento da máquina, entre outros.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros de usinagem de rotação da ferramenta, velocidade de avanço e profundidade de corte nas forças de usinagem de uma fresadora CNC de pequeno porte (hobby), programada em Arduino na usinagem dos materiais alumínio 6351 T6, cobre eletrolítico e latão liga 360. Como medição complementar, foram medidas as temperaturas do motor do eixo Y durante todos os ensaios, para verificar sobrecarga durante o processo.

2.1 FORÇA DE USINAGEM

De acordo com Abreu (2010), para usinar uma peça através da remoção de cavacos, é necessário deformar o seu material, utilizando uma ferramenta que exerça força sobre ela. Ferraresi (1970) define que a força de usinagem é a força total atuante sobre uma cunha cortante durante o processo de usinagem.

A força de corte F_c, que é a principal componente da potência de usinagem para dimensionamento dos motores de uma máquina, varia de acordo com a seção do cavaco, de maneira quase linear. Isso foi constatado experimentalmente no início do século XX por diversos pesquisadores. Da relação proposta, foi criada a primeira equação para determinação da força de corte (EQUAÇÃO 1), onde a pressão específica de corte deve ser dada em N/mm² e a área da seção de corte em mm² (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2009):

$$F_c = k_s * A \quad (1)$$

A pressão específica de corte k_s é definida como a força necessária para usinar uma área de corte igual a 1,0 mm². Anteriormente, pensava-se que esse parâmetro variava exclusivamente de acordo com as características do material, porém, ensaios práticos demonstraram que a pressão específica de corte varia com os seguintes fatores: material da peça, material da ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, geometria da ferramenta, estado de afiação da ferramenta, uso de fluido de corte (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2009).

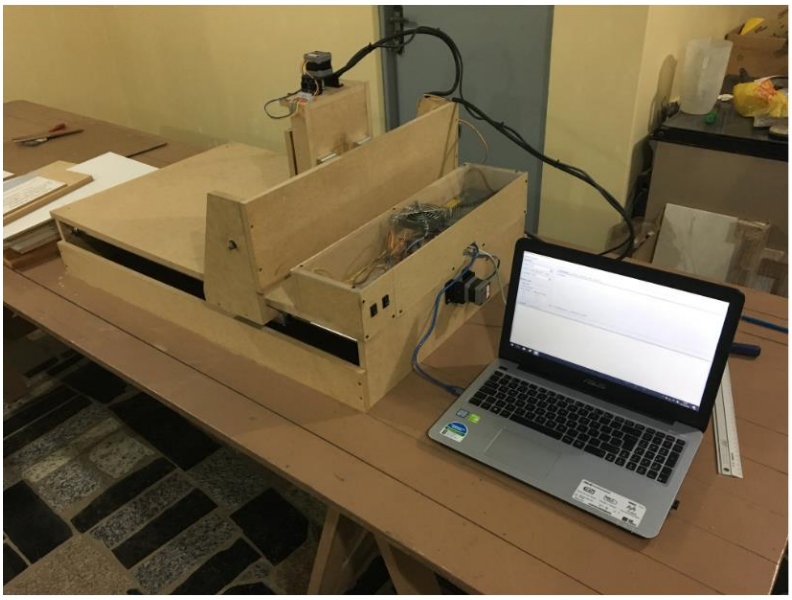
A área da seção de corte é a área de um cavaco que será retirado no plano normal à direção de corte, podendo ser calculada de acordo com a (EQUAÇÃO 2), onde b é a largura do gume da ferramenta em mm, e h é a profundidade de corte em mm (MACHADO; ABRÃO; COELHO; SILVA, 2009):

$$A = b * h \quad (2)$$

2.2 FRESADORA CNC HOBBY UTILIZADA PARA OS ENSAIOS

O estudo das forças de usinagem foi realizado em uma fresadora CNC hobby de baixo custo, idealizada e montada pelos autores durante a trajetória acadêmica. O protótipo finalizado pode ser visualizado na FIGURA 1.

FIGURA 1 - PROTÓTIPO DA FRESADORA CNC UTILIZADA NOS ENSAIOS



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

2.3 FRESA DE TOPO

Foi escolhida a fresa referência 06020074 da marca OSG para realização dos estudos. Esse modelo de fresa é recomendada para fresamentos normais de faceamento e rasgo de chaveta (OSG, 2019). Na TABELA 1 são apresentadas as especificações dessa ferramenta, fornecidas no catálogo do fabricante.

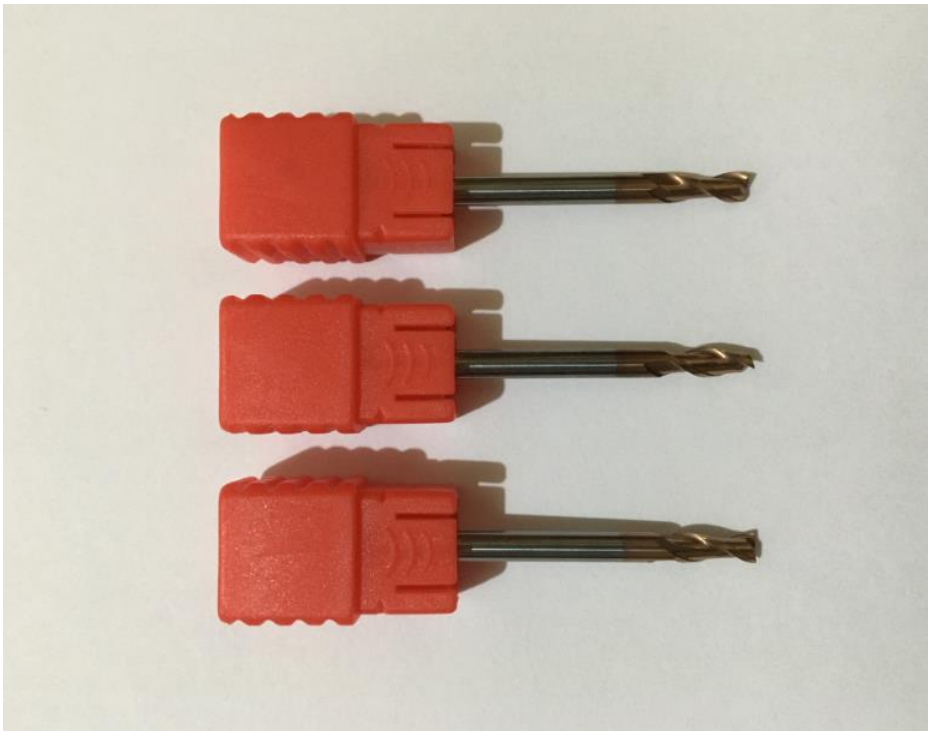
TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES DA FRESA OSG 0602007

Característica	**Especificação**
Fabricante	OSG
Modelo	06020074
Matéria-prima principal	HSS-Co (aço rápido ao cobalto)
Revestimento	TiN (nitreto de titânio)
Diâmetro de corte	3,0 mm
Número de arestas de corte	2

FONTE: OSG (2019)

Visando reduzir os impactos causados por desgaste da ferramenta, foram adquiridas três fresas, e foi utilizado uma para cada material testado. Na FIGURA 2 é possível visualizar as fresas adquiridas.

FIGURA 2 - FRESAS ADQUIRIDAS PARA OS TESTES



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2020)

De acordo com a OSG (2019), os valores dos parâmetros de usinagem disponíveis no catálogo são recomendações gerais, e que podem ser alterados de acordo com cada processo de usinagem. Levando isso em consideração, assim como a metodologia de planejamento fatorial 2^k, foram definidos os níveis para os fatores de controle utilizados nos experimentos, descritos na TABELA 2.

TABELA 2 – NÍVEIS DOS FATORES DE CONTROLE

Parâmetro de usinagem	**Nível -**	**Nível +**
Rotação (rpm)	5.000	10.000
Velocidade de avanço (mm/min)	100,0	200,0
Profundidade de corte (mm)	1,0	2,0

FONTE: Autoria própria (2020)

2.4 MATERIAIS ANALISADOS NOS ENSAIOS DE FRESAMENTO DE TOPO

Para o estudo das forças de usinagem do fresamento de topo, foram escolhidos os seguintes metais não ferrosos, de forma arbitrária, seguindo apenas a condição de terem baixa dureza: alumínio 6351 T6, cobre eletrolítico e latão liga 360.

Além disso, os materiais escolhidos podem ser comprados facilmente no mercado regional. As propriedades mecânicas dos três materiais podem ser visualizadas na TABELA 3.

TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Material	**Resistência à tração (kgf/mm²)**	**Escoamento (kgf/mm²)**	**Dureza Brinell (HB)**
Alumínio 6351 T6	29	26	95
Cobre eletrolítico	32	27	90
Latão liga 360	44	30	115

FONTE: Shockmetais (2019)

2.4.1 Dimensional e identificação dos corpos de prova

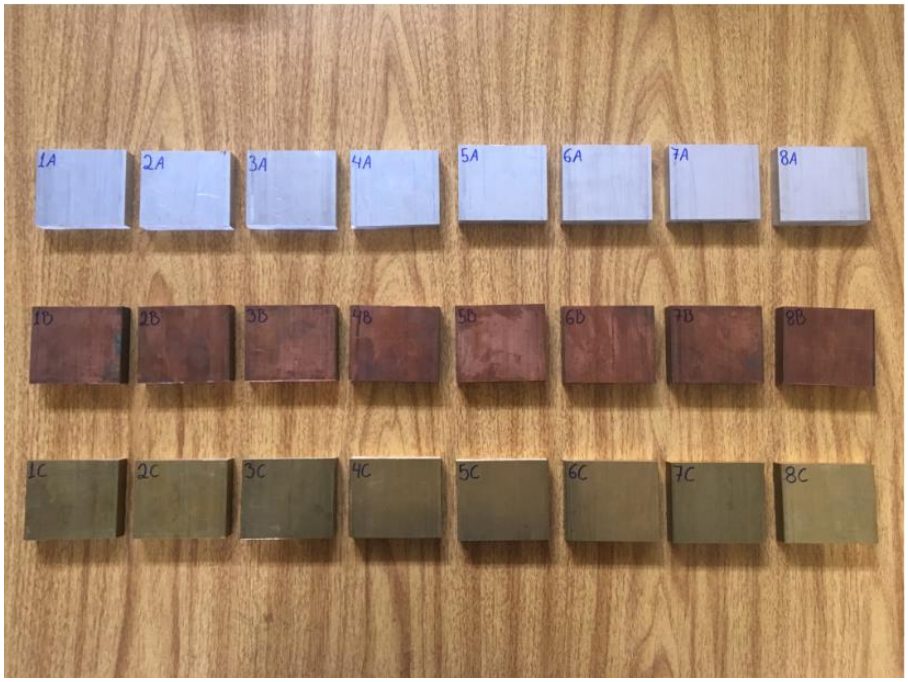
Os dimensionais dos corpos de prova de todos os materiais foram padronizados, com comprimento de 76,2 mm, largura de 64,0 mm e espessura de 15,87 mm.

Para facilitar a identificação, cada corpo de prova foi marcado com um número sequencial e uma letra, separado por tipo de material, conforme sequência abaixo:

- Alumínio 6351 T6: de 1A a 8A;
- Cobre eletrolítico: de 1B a 8B;
- Latão liga 360: de 1C a 8C.

Os corpos de prova utilizados no experimento, devidamente identificados, podem ser visualizados na FIGURA 3. Todos foram adquiridos com acabamento laminado. Não foi realizado nenhuma preparação ou acabamento na superfície antes da realização dos ensaios, apenas a remoção de poeira e eventuais resíduos, com auxílio de um pano seco.

FIGURA 3 – CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2020)

2.5 DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM

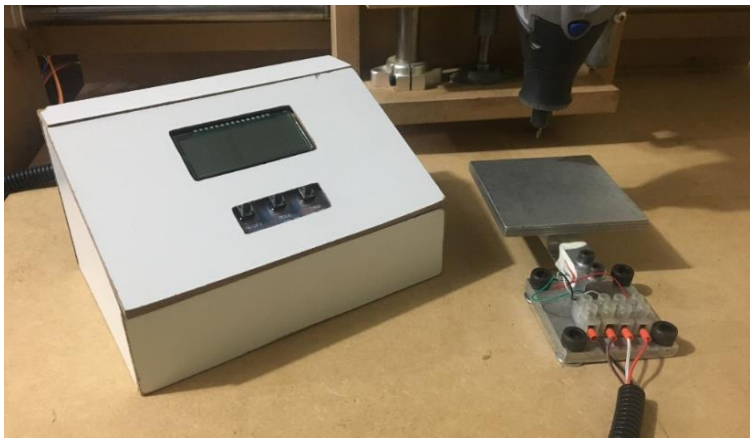
Os testes de controle das forças de usinagem de fresamento de topo foram feitos com a utilização de uma célula de carga modelo *single point*, retirada de uma balança de precisão modelo SF-400, que funciona baseada na variação da resistência ôhmica. Quando submetido a uma deformação, a célula mede a força que a ferramenta exerce contra o material. O visor apresenta valores de 1,0 g a 10,0 kg, com graduação de 1,0 g.

O percurso da usinagem para cada corpo de prova foi padronizado. A extensão da usinagem foi de 50,0 mm. A largura da usinagem foi a mesma da ferramenta utilizada nos ensaios, que possui diâmetro igual a 3,0 mm.

O dispositivo montado na fresadora CNC pode ser visualizado na FIGURA 4. A base de fixação do corpo de prova foi nivelada com o auxílio do aplicativo “Nível”, nativo do smartphone Apple Iphone 6s, na versão do sistema operacional iOS 12.2.

Os corpos de prova foram fixados na base do dispositivo de medição de forças com o auxílio de fita dupla face do tipo espuma. Os dados apresentados no visor do dispositivo foram coletados através de gravação de vídeo, onde posteriormente foi realizado a anotação dos valores a cada intervalo de 0,5 segundo de usinagem. Para a análise dos dados, foi utilizado a média aritmética simples de todos os valores, desconsiderando o primeiro e o último valor obtido, referente à entrada e saída da ferramenta durante o processo.

FIGURA 4 - DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO MONTADO NA FRESADORA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2020)

2.6 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR DO EIXO Y

As temperaturas do motor de passo do eixo Y da fresadora foram medidas durante o processo com o auxílio de um pirômetro Fluke 62 Mini IR, que é ilustrado na FIGURA 5. A variação de temperatura foi utilizada como um parâmetro de monitoramento durante o processo de usinagem, visando verificar se o motor ficaria sobrecarregado. Foi escolhido o motor do eixo Y, pois é o motor responsável pela movimentação da ferramenta por toda a extensão da usinagem.

FIGURA 5 - PIRÔMETRO FLUKE 62 MINI IR



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2020)

O equipamento foi posicionado a uma distância de 15,0 mm do motor do eixo Y, com auxílio de um suporte plástico. Mantendo o gatilho do pirômetro pressionado, o visor passa a mostrar a variação de temperatura durante o tempo. Foi utilizado dessa forma

durante o processo de usinagem. Os dados apresentados no visor foram coletados através da gravação de vídeo durante o ensaio, e posteriormente foi realizado a anotação da temperatura máxima atingida durante a usinagem.

2.7 RESULTADOS DE FORÇAS OBTIDOS DURANTE OS ENSAIOS

As tabelas com os valores médios das forças de usinagem obtidas durante os ensaios são apresentadas abaixo. Os ensaios foram realizados de maneira aleatória, conforme determinado pelo planejamento fatorial 2^k. Também é possível visualizar nas tabelas o desvio padrão das medidas, ou seja, a dispersão dos valores em relação à média.

A TABELA 4 apresenta as forças do alumínio 6351 T6. Na TABELA 5 é possível visualizar os dados do cobre eletrolítico. Já na TABELA 6 encontra-se as forças obtidas nos ensaios do latão liga 360.

TABELA 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORÇA DO ALUMÍNIO 6351 T6

Amostra	**Fatores de Controle**			**Ordem dos ensaios**	**Força média eixo Z (N)**
	Rotação	Avanço	Profundidade		
1A	-	-	-	3	12,86 ± 0,63
2A	+	-	-	9	12,28 ± 0,33
3A	-	+	-	18	14,58 ± 0,96
4A	+	+	-	15	13,41 ± 0,65
5A	-	-	+	13	21,52 ± 0,96
6A	+	-	+	11	21,03 ± 0,58
7A	-	+	+	2	22,52 ± 0,81
8A	+	+	+	6	22,19 ± 1,41

FONTE: Autoria própria (2020)

TABELA 5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORÇA NO COBRE ELETROLÍTICO

Amostra	**Fatores de Controle**			**Ordem dos ensaios**	**Força média eixo Z (N)**
	Rotação	Avanço	Profundidade		
1B	-	-	-	8	12,53 ± 0,55
2B	+	-	-	12	11,69 ± 0,37
3B	-	+	-	23	14,31 ± 0,62
4B	+	+	-	5	13,95 ± 0,47
5B	-	-	+	10	22,22 ± 0,61
6B	+	-	+	1	21,15 ± 0,74
7B	-	+	+	20	24,64 ± 1,34
8B	+	+	+	22	23,38 ± 1,40

FONTE: Autoria própria (2020)

TABELA 6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORÇA NO LATÃO LIGA 360

Amostra	Fatores de Controle			Ordem dos ensaios	Força média eixo Z (N)
	Rotação	Avanço	Profundidade		
1C	-	-	-	7	12,72 ± 0,40
2C	+	-	-	19	11,88 ± 0,33
3C	-	+	-	16	15,46 ± 1,13
4C	+	+	-	21	13,54 ± 0,94
5C	-	-	+	4	20,86 ± 1,16
6C	+	-	+	24	20,24 ± 1,33
7C	-	+	+	17	24,41 ± 1,57
8C	+	+	+	14	22,69 ± 0,77

FONTE: Autoria própria (2020)

2.8 INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO, AVANÇO E PROFUNDIDADE NA FORÇA DE USINAGEM NO ALUMÍNIO 6351 T6

2.8.1 Efeito principal da rotação na força de usinagem

Com o aumento da rotação de 5.000 rpm para 10.000 rpm, a força de usinagem sofreu uma redução média de 0,64 N. Este resultado indica que a rotação não influencia de maneira significativa a força de usinagem para esse intervalo de rotação estudado, pois o valor da variação está dentro do erro de medição. A força de usinagem depende principalmente da pressão específica de corte k_s e da área de corte *A*, conforme a EQUAÇÃO 1 ($F_c = k_s * A$). Segundo Machado, Abrão, Coelho e Silva (2009), a pressão especifica de corte não possui valores fixos para cada material, sendo necessário realização de ensaios em laboratório para cada condição de ferramenta e peça. Fórmulas aproximadas relacionam a pressão específica de corte k_s em função da espessura de corte *h* e do ângulo de posição da ferramenta, além das propriedades mecânicas dos materiais. A área de corte *A* é definida exclusivamente em função da profundidade de corte e da velocidade de avanço da ferramenta. Como os valores citados não variam com a rotação da ferramenta, a força de usinagem não é influenciada de maneira significativa, como demonstrado nos resultados experimentais.

Os resultados também indicam que a rotação não interage com os outros fatores de controle do experimento (avanço e profundidade de corte), pois não há alteração significativa na média das medidas das forças com a variação desses parâmetros. Isso significa que, independente dos valores do avanço e da profundidade, a variação apenas

da rotação não irá produzir mudanças na força de usinagem, dentro dos intervalos estipulados.

2.8.2 Efeito principal do avanço na força de usinagem

De acordo com os resultados obtidos, aumentar a velocidade de avanço de 100,0 mm/min para 200,0 mm/min, mantendo os demais parâmetros inalterados, provoca um baixo aumento força de usinagem, com valor médio observado de 1,25 N durante os ensaios.

A área de corte é calculada de acordo com a largura do dente da ferramenta e da profundidade de corte, conforme EQUAÇÃO 2 ($A = b * h$). O fluxo lateral de cavaco aumenta com o aumento do avanço, fazendo com que parte do material deformado não se transforme em cavaco, e somente deslize sobre a superfície da ferramenta (MACHADO, ABRÃO, COELHO; SILVA, 2009). Mesmo com o aumento do avanço, esse fenômeno faz com que a força de usinagem não sofra um aumento elevado, conforme medido nos experimentos.

Os resultados também demonstram que não há interação do avanço com os outros fatores de controle dos experimentos (rotação e profundidade), pois o aumento médio da força de usinagem causado pelo aumento somente do avanço não sofre variação considerável quando os outros parâmetros são alterados.

2.8.3 Efeito principal da profundidade na força de usinagem

Os resultados mostram que a profundidade de corte é o parâmetro que mais influenciou na força de usinagem. Quando esse parâmetro foi alterado de 1,0 mm para 2,0 mm, a força de usinagem aumentou 8,53 N, em média. De acordo com Machado, Abrão, Coelho e Silva (2009), a força de usinagem aumenta com a área da seção de corte, conforme EQUAÇÃO 1 ($F_c = k_s * A$) . A área da seção de corte aumenta proporcionalmente com a profundidade de corte, de acordo com a EQUAÇÃO 2 ($A = b * h$) . Dessa forma, a força de usinagem aumenta proporcionalmente à profundidade de corte, conforme observado nos experimentos.

Os valores obtidos demonstram que a profundidade de corte não interage com os outros parâmetros utilizados nos ensaios (rotação e avanço). Apesar de a força aumentar consideravelmente com o aumento da profundidade, o aumento médio não depende da variação dos outros parâmetros.

2.9 INFLUÊNCIA DO MATERIAL USINADO NA FORÇA DE USINAGEM

Os efeitos principais dos parâmetros na força de usinagem para os demais materiais, realizados com o mesmo procedimento de análise do planejamento fatorial do alumínio 6351 T6, foram compilados na TABELA 7, onde consta a média dos valores. Para auxiliar na visualização, os valores obtidos no alumínio 6351 T6 também foram incluídos.

TABELA 7 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA TODOS OS MATERIAIS

Material	**Variação média da força (N)**		
	Rotação	**Avanço**	**Profundidade**
Alumínio 6351 T6	-0,64 ± 0,82	1,25 ± 0,77	8,53 ± 0,82
Cobre eletrolítico	-0,88 ± 0,77	2,17 ± 0,73	9,73 ± 0,81
Latão liga 360	-1,27 ± 1,05	2,60 ± 1,05	8,65 ± 1,04

FONTE: Autoria própria (2020)

Analisando os dados tabelados, observa-se que o aumento da rotação de 5.000 rpm para 10.000 rpm causou uma tendência de redução na força de usinagem para os três materiais. Conforme descrito por Santos e Sales (2007), o aumento da rotação provoca um aumento da temperatura da peça, que reduz a resistência ao cisalhamento do material, e consequentemente a força de usinagem reduz. A temperatura da peça não foi monitorada durante os experimentos.

Para os três materiais, a variação do avanço de 100,0 mm/min para 200,0 mm/min causou um aumento na força de usinagem, conforme observado nos dados apresentados durante os ensaios. O aumento da força ocorreu pois houve aumento da seção de corte, porém, o fluxo lateral de cavaco faz com que a força não aumente de maneira expressiva (MACHADO, ABRÃO, COELHO; SILVA, 2009). A influência do fluxo lateral de cavaco não foi analisada nos ensaios, mas os resultados obtidos indicam que esse fenômeno ocorreu, pois, os valores das forças não aumentaram significativamente.

Assim como ocorreu no alumínio 6351 T6, o fator que mais influenciou na força de usinagem foi a profundidade de corte para os demais materiais utilizados nos estudos. Em todos os casos, o aumento da profundidade provocou aumento na força de usinagem. A profundidade de corte está diretamente relacionada com o aumento da área da seção de corte, conforme a EQUAÇÃO 2 ($A = b * h$). Da mesma maneira, a área da seção de corte está diretamente relacionada com a força de usinagem, de acordo com a EQUAÇÃO 2 ($F_c = k_s * A$).

Mesmo com a mudança no material, os aumentos e reduções das forças foram similares para todos. Cada material teve seus valores absolutos durante os ensaios, mas a variação observada nos efeitos principais dos parâmetros foi similar em todos os casos.

4.10 INTERAÇÃO DOS FATORES

Foram analisadas as interações entre os fatores para todos os materiais. Os valores obtidos podem ser visualizados na TABELA 8, de maneira resumida.

TABELA 8 - INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES DE TODOS OS MATERIAIS

Interação entre os fatores	Alumínio 6351 T6	Cobre eletrolítico	Latão liga 360
Rotação x Profundidade	0,23 ± 0,79	-0,28 ± 0,76	0,11 ± 0,95
Rotação x Avanço	-0,11 ± 0,79	0,07 ± 0,76	-0,55 ± 0,95
Avanço x Profundidade	-0,17 ± 0,79	0,16 ± 0,76	0,40 ± 0,95

FONTE: Autoria própria (2020)

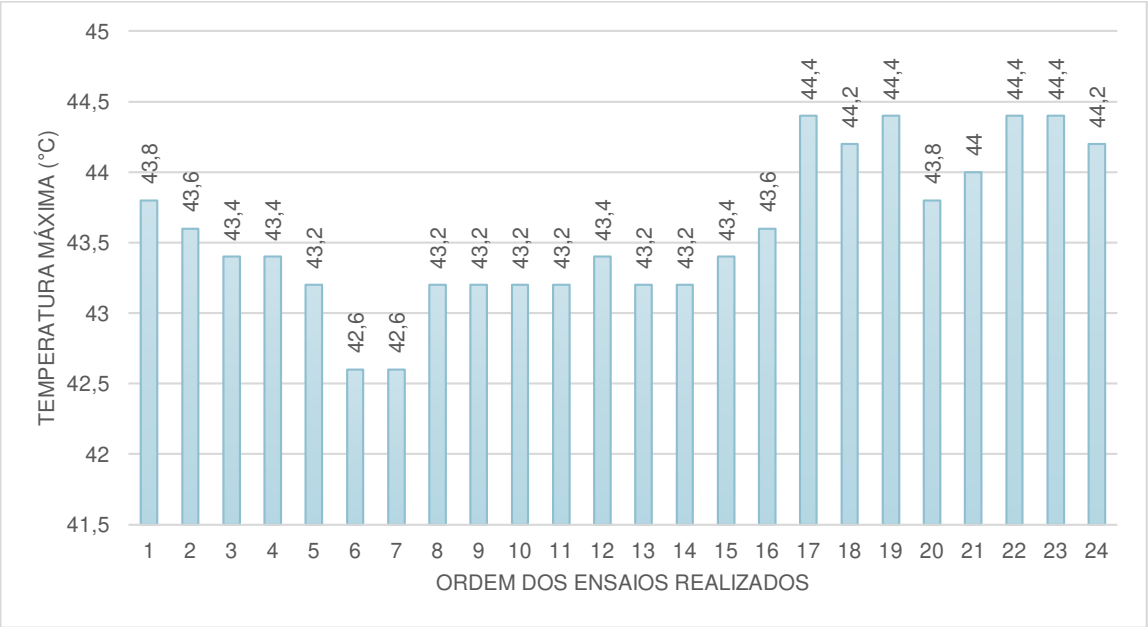
Mesmo com a alteração do material utilizado nos ensaios, as interações se comportaram de maneira similar ao alumínio 6351 T6, ou seja, os fatores mostraram ser aditivos nos níveis estudados. A variação das forças foi estatisticamente similar em todos os casos. Individualmente cada parâmetro influencia na força de usinagem, mas a alteração de um não influenciou no resultado do outro durante a medição.

4.11 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO MOTOR EIXO Y

No GRÁFICO 1 é possível verificar a temperatura máxima atingida em cada um dos 24 ensaios realizados, de maneira cronológica. A temperatura foi uma medição complementar para verificar se os motores não ficariam sobrecarregados durante a realização dos ensaios, e se alguma combinação específica de parâmetros de usinagem causaria a sobrecarga.

As temperaturas máximas atingidas pelo motor do eixo Y da fresadora, variaram entre 42,6 °C e 44,4 °C durante a execução dos ensaios. De acordo com as especificações técnicas do fabricante do motor de passo utilizado no projeto, a classe de isolação é “B”, que recomenda uma temperatura máxima de operação de 130°C. Dessa forma, as temperaturas observadas estão dentro da especificação, e nenhum parâmetro sobrecarregou o motor de forma a deixá-lo fora de sua faixa de operação.

GRÁFICO 1 - TEMPERATURA MÁXIMA DO MOTOR DURANTE OS ENSAIOS



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2020)

3. CONCLUSÃO

Todos os ensaios foram realizados de acordo com o previsto no planejamento fatorial. Evidenciou-se que dos três fatores de controle considerados (rotação da ferramenta, velocidade de avanço e profundidade de corte), apenas o parâmetro de profundidade de corte causou uma grande variação na força de usinagem, considerando os intervalos de valores estudados.

Para os três materiais analisados, o aumento da rotação da ferramenta tendeu a reduzir a força de usinagem. Da mesma forma, o aumento da velocidade de avanço provocou um leve aumento na força observada. O aumento da profundidade de corte refletiu um grande aumento no valor da força de usinagem.

Os três parâmetros de usinagem mostraram-se aditivos. Cada um deles influenciou a força de usinagem de alguma forma, mas a variação de um deles não causou variação no outro.

Pela medição da temperatura, o motor não sofreu sobrecarga em nenhum ensaio realizado, demonstrando estar corretamente dimensionado.

O dispositivo para medição de forças demonstrou potencial para ser utilizado em diversas outras ocasiões, podendo auxiliar no dimensionamento de máquinas e equipamentos.

4. REFERÊNCIAS

ABREU, Pedro Jorge Moreira de. **Análise e otimização dos processos de fresamento a altas velocidades no contexto de ferramentaria.** 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Mecânica dos Sólidos e Estruturas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://www.ccm-ita.org.br/ccmita/files/usinagem-teses/tese_pedro.pdf>. Acesso em: 02 out. 2019.

CARVALHO, Thales de Assis. **Modelagem das forças de usinagem no microfresamento de topo em materiais com revestimento**. 2015. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Enegenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014935.pdf. Acesso em: 05 maio 2020.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Blucher, 1970. 751 p.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. 371 p.

MERCADO LIVRE (Brasil). **Cnc Router - A6550 Estrutura Em Alumínio.** 2019. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1370761867-cnc-router-a6550-estrutura-em-aluminio-_JM#position=21&type=item&tracking_id=c78c88b1-4c9e-485f-b84e-96a169903dba>. Acesso em: 1 dez. 2019.

MERCADO LIVRE (Brasil). **Cnc Router Completa Para Mdf, Acrílicos, Plásticos, Isopor.** 2019. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1152857403-cnc-router-completa-para-mdf-acrilicos-plasticos-isopor-_JM#position=14&type=item&tracking_id=0fa1628e-2aaf-4f46-accd-2147b3661165>. Acesso em: 11 dez. 2019.

MERCADO LIVRE (Brasil). **Fresadora Ferramenteira Clever Iso 40.** 2019. Disponível em: <https://lista.mercadolivre.com.br/fresadora_PriceRange_40000-40000>. Acesso em: 11 dez. 2019.

OSG. **Catálogo geral OSG vol. 2019**. Disponível em: <https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo_geral_osg/web/html5/?pn=17>. Acesso em: 02 nov. 2019.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SHOCKMETAIS (Brasil). **Tabelas de medidas, pesos e informações técnicas.** 2019. Disponível em: <https://shockmetais.com.br/tabelas/cobre/pmec>. Acesso em: 01 nov. 2019.