

ANÁLISE ENTRE OS ESFORÇOS DE USINAGEM E O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÁQUINA-FERRAMENTA

Paulo Vinícius da Silva Resende, paulo.vinicius@ifg.edu.br¹

Aylton José Alves, aylton.alves@ifg.edu.br²

Ildeu Lúcio Siqueira, ildeu.siqueira@ifg.edu.br¹

Silane Neves da Silva, silanesns@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Goiás - NUPEF, Rua 75, 46 - Setor Central, Goiânia - GO, 74055-110

²Instituto Federal de Goiás - NexT, Rua 75, 46 - Setor Central, Goiânia - GO, 74055-110

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar a correlação entre as forças de corte no fresamento de topo do aço inoxidável PH13 8Mo e o consumo de energia elétrica em processo. Utilizou-se o planejamento fatorial 2k de três variáveis (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), enquanto as variáveis de resposta foram as Forças de Usinagem F_x e F_y e as Potências Elétricas associadas. Avaliou-se o efeito de cada variável independente, bem como a interação entre elas no consumo de energia elétrica da máquina ferramenta em termos da Potência de Distorção e sua correlação entre a resposta respectiva dos esforços de usinagem. A mudança de níveis dos parâmetros de corte no ensaio não influenciou o incremento da parcela de potência distorciva devido às perturbações harmônicas. O parâmetro de corte com maior influência nos valores de força de usinagem foi a profundidade de corte, seguida da velocidade de avanço.

Palavras-chave: Fresamento, Potência Elétrica, Esforços de Usinagem.

1. INTRODUÇÃO

A busca periódica da inovação tecnológica é realidade bastante conhecida em diversos setores da economia e, em especial, a evolução exponencial da indústria metal-mecânica nas últimas décadas que tornou produtos de alto valor agregado com competitividade no âmbito global (Barbosa et al *apud* Dedalus Consulting, 2011; Suarez, 2012).

As máquinas-ferramentas atuais são o resultado de diversas pesquisas e desenvolvimentos. A iniciativa para o desenvolvimento do Comando Numérico Computadorizado (CNC) para máquina-ferramenta foi fomentada pela Força Aérea Americana, que no ano de 1951 testou o primeiro modelo de fresadora CNC em parceria com o Laboratório de Servomecanismos do MIT. À época, o setor bélico demandava fabricar peças complexas com maior rapidez e menor custo do que o processo convencional que depende de habilidades do operador Heinrich (2001).

Com os acréscimos de novos dispositivos auxiliares, até a concepção de centros de usinagem que acumulam versatilidade e capacidade de executar diversos processos de usinagem em uma máquina-ferramenta, fundamentalmente as fresadoras com interface CNC são compostas de dispositivos eletrônicos e, como pontuado por Ortmann (2014), dispositivos semicondutores de potência apresentam comportamento não-linear caracterizado pela diferença entre a forma de onda da corrente drenada pela carga da forma de onda da tensão de suprimento da mesma.

Segundo Melo *et al.* (2010) as perturbações harmônicas são sinais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental da rede elétrica, no Brasil 60 Hz. Os harmônicos somam-se à componente fundamental do sinal elétrico senoidal e alteram a qualidade da tensão distribuída. Os autores reiteram que, o ônus dos distúrbios associados à qualidade de energia é do consumidor final e não das concessionárias de energia.

Neste contexto, uma pesquisa de Castilho (2013), baseada no Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), concluiu-se que houve uma crescente demanda de energia elétrica no Brasil entre os anos de 2010 e 2013, puxada pelo consumo industrial, cerca de 39,8% do total produzido no país.

Segundo Muller (2013) *apud* Carvalho e Gomes (2015), cerca de dez mil máquinas são instaladas por ano no Brasil. Os autores pontuam que, cada máquina possui uma demanda constante quando ligada sem produção de 4 kW e uma vida útil de aproximadamente 10 anos, o somatório das máquinas instaladas no país acarretará um consumo de 400.000 kW, sem agregar valor ao processo de fabricação e representando aproximadamente 2% da potência em instalação desse conjunto no Brasil no ano de 2013, segundo relatório de capacidade da Agência Nacional de Energia Elétrica à época.

Estima-se que o consumo de energia elétrica nos processos de usinagem represente 21% do custo operacional de máquina-ferramenta e que, por consequência, este fator afete a competitividade do produto final. Concomitante, a escolha dos parâmetros de corte é tipicamente feita a partir da recomendação do fabricante da ferramenta e da capacidade da máquina com critérios que resguardam a vida da ferramenta de corte, baixos níveis de força de corte e bom acabamento superficial.

A Figura (1) apresenta os custos operacionais de uma máquina ferramenta, de acordo com Carvalho e Gomes (2015).

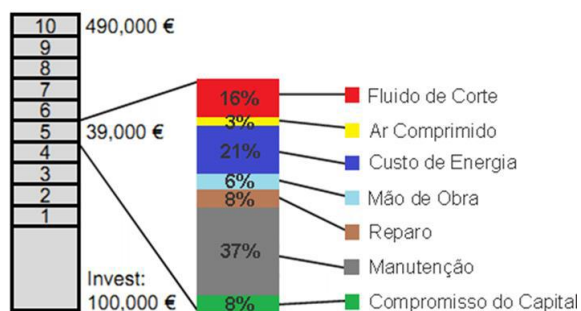


Figura 1. Custo operacional de uma máquina ferramenta
Fonte: Carvalho e Gomes (2015).

Carvalho e Gomes (2015) propõem um método de avaliação energética em máquinas-ferramenta em função da energia consumida durante o tempo ativo de usinagem e da energia em modo ocioso, *stand-by*. O cálculo da eficiência energética foi obtido pela razão entre a energia consumida pelo processo de usinagem E_{usi} e a energia consumida pela máquina ferramenta no modo ocioso E_{mfo} conforme Eq. (1).

$$\eta = \frac{E_{usi}}{E_{mfo}} \quad (1)$$

Os autores executaram testes em dois modelos de centros de usinagem do fabricante Grob, cada uma realizando doze operações distintas em ferro fundido, sob aquisição dos sinais elétricos de tensão e corrente. Constatou-se que a eficiência energética das operações de um sistema flexível de manufatura varia entre 20% e 48%, demonstrando que a maior parte da energia elétrica consumida não é utilizada para remover cavaco, ou seja, é consumida por componentes alimentados durante o modo ocioso. Por fim, os autores propõem para um material mais dúctil e de maior usinabilidade, tanto a potência da máquina-ferramenta CNC devido aos seus dispositivos auxiliares quanto seu dimensionamento, deveriam ser customizados ao material a ser usinado, visto que, nos testes com a usinagem de ferro fundido *versus* alumínio, o consumo com CNC, fonte e ventiladores foi equiparado.

O fresamento é a operação de usinagem que se caracteriza essencialmente pelo movimento relativo entre a ferramenta de corte, denominada fresa, que gira em torno do seu eixo à determinada rotação e o movimento de avanço retilíneo da peça em usinagem, fixada na mesa da máquina, que lhe confere forma e dimensão desejada. O fresamento frontal, apresentado esquematicamente na Fig. 2, é uma operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. Quanto ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta, o processo pode ser classificado em concordante, no qual a direção de saída do cavaco coincide à de avanço da peça ou discordante, discordante, caso os cavacos sejam projetados na direção oposta do avanço, ou combinado Diniz et al. (2008).

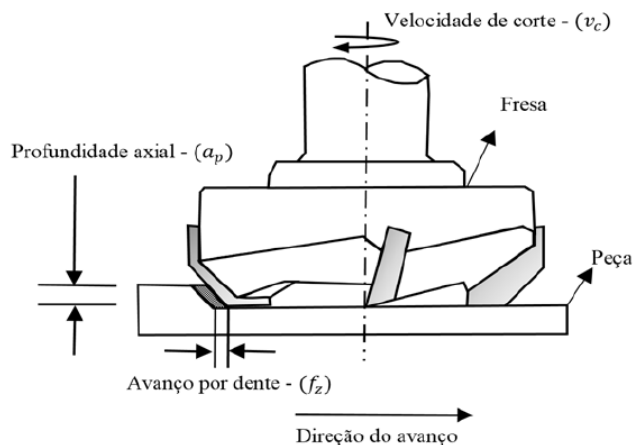


Figura 2. Modelo esquemático do processo de fresamento de topo e suas principais variáveis
Fonte: Machado et al (2015) apud Nascimento e Oliveira (2016)

Os esforços cisalhantes durante a remoção de cavaco nos processos de usinagem ocasionam vibrações nos conjuntos da máquina e na ferramenta de corte, além de cargas nos atuadores elétricos da máquina ferramenta. Diniz et

al (1999) pontuam que o estudo das forças de usinagem são determinantes para caracterizar as condições de corte na qual o consumo de energia, a vida da ferramenta e as qualidades dimensionais e de superfície sejam otimizadas.

Entretanto, a baixa usinabilidade de alguns materiais como os aços inoxidáveis é traduzida no encurtamento da vida de ferramenta de corte e ao alto consumo de potência, suas propriedades mecânicas de elevada tenacidade, resistência à corrosão e dureza devido à presença de elementos de liga (Cr, Ni, Mo), causam altas deformações plásticas promovendo elevadas forças de corte e de avanço (GENNARI JÚNIOR e MACHADO, 1999).

Segundo Silva e Mei (2010) os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação foram desenvolvidos inicialmente para aplicação aeronáutica, mas vêm sendo utilizados amplamente por outros campos, como nas indústrias de extração de petróleo, química e outras. Aplicações críticas nas quais a resistência à corrosão e elevadas propriedades mecânicas, desejadas até 425°C, justificam o emprego destes materiais.

Nesta perspectiva, o objetivo desta pesquisa é investigar os efeitos causados pela mudança de níveis das variáveis de corte no consumo de energia elétrica na operação de desbaste por fresamento de topo do aço inoxidável PH13 8Mo, considerado um material de baixa usinabilidade. Tendo em vista a parcela proveniente da usinagem, a eficiência da máquina ferramenta pode associar-se não apenas ao gasto energético no modo ocioso, mas aos parâmetros de corte em condições críticas de avanço de corte. A escassez de pesquisas neste âmbito foi a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho que apresenta um método capaz de associar as características de baixa usinabilidade do material, níveis de força de corte e sua correlação com a demanda de energia.

1.1. Potência Elétrica

Em um trabalho recente de Moraes et al (2016) explorou-se sobre a medição de potência reativa em sistemas industriais sujeito à distorções harmônicas. Os autores descrevem a formulação analítica das grandezas elétricas, como as formas de onda de tensão Eq. (2) e corrente Eq. (3).

$$v(t) = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

Onde $v(t)$ e $i(t)$ são funções temporais senoidais que variam entre zero e os valores máximos ou de pico $V_{\max}$ e $I_{\max}$, com frequência angular $\omega = 2\pi f$. A corrente é representada com a adição de um ângulo de defasamento θ , entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, pois nem sempre as duas ondas estão em fase.

A potência aparente S Eq. (4) é a potência real, efetivamente consumida, resultado da soma vetorial da componente Q Eq. (5), denominada potência reativa e P a potência ativa de um circuito Eq. (6), em um sistema trifásico equilibrado senoidal, respectivamente em função da corrente e tensão eficaz (RMS).

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (4)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \sin \theta \quad (6)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \cos \theta \quad (5)$$

Em sistemas não senoidais são encontradas deformidades nas ondas de tensão e/ou corrente. Essas deformidades são causadas por cargas não lineares que provocam distorções harmônicas, que modificam a forma de se calcular as potências. Cada componente harmônica possui um frequência maior que a fundamental. As componentes da potência ativa e reativa neste caso são dadas pelas Eq. (7) e Eq. (8), respectivamente.

$$P' = \sum_{n=1}^{\infty} P_h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\theta_h) \quad (7)$$

$$Q' = \sum_{n=1}^{\infty} Q_h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin(\theta_h) \quad (8)$$

Como proposto por de La Rosa (2006), há uma terceira componente de potência denominada distorciva, calculado de acordo com a Eq. (9).

$$D = \sqrt{\sum_{h \neq k}^{h,k} (V_h^2 \cdot I_k^2 + V_k^2 \cdot I_h^2 - 2 \cdot V_h \cdot I_h \cdot V_k \cdot I_k \cdot \cos(\theta_h - \theta_k))} \quad (9)$$

Por fim, a Eq. (10) apresenta a forma de calcular a potência aparente de um sistema submetido à distorções harmônicas, que é o somatório vetorial dos componentes de potência P' , Q' e D . A Figura (3) apresenta a distribuição das potências por meio de um tetraedro.

$$S' = \sqrt{P'^2 + Q'^2 + D^2} \quad (10)$$

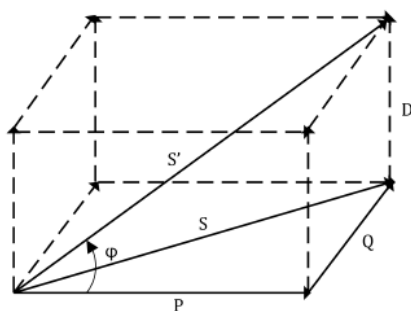


Figura 3. Tetraedro de potências para cargas não lineares.

1.2. Determinação das Forças de Corte

Segundo Álisson *et al.* (2009) as forças de usinagem associadas ao fresamento frontal podem ser expressas conforme o modelo da Fig. (4), com seus principais componentes tomados em relação à aresta de corte da fresa no plano de trabalho.

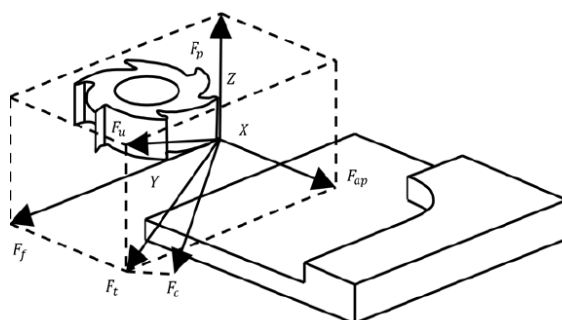


Figura 4. Disposição dos esforços de usinagem no fresamento frontal Nascimento and Oliveira (2016)

A representação dos esforços de usinagem é convencionada pela norma DIN 6484. Com este sistema de coordenadas adotado, define-se a composição da força ativa F_t pelo somatório vetorial no plano X-Y das forças atuantes, conforme Eq. (11).

$$F_t = F_{ap} + F_f + F_c \quad (11)$$

Onde F_{ap} é a força de apoio, F_f a força de avanço e F_c a força de corte.

A Equação (12) mostra como calcular a força de usinagem F_u , obtida por uma segunda soma vetorial, desta vez feita entre F_t e a força passiva F_p , que coincide com a direção do eixo Z.

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (12)$$

A Equação (13) mostra a expressão da força de usinagem pode ser escrita em função das três componentes cartesianas, tal que a força ativa da Eq. (1) é a combinação vetorial de F_x e F_y e a passiva F_z .

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (13)$$

Um dos métodos mais disseminados na determinação das forças de corte durante a usinagem é mediante a utilização de um dinamômetro pela aquisição eletrônica dos sinais de força nos eixos do sistema de coordenadas globais X, Y e Z.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura (5a) mostra o aparato para medição dos sinais elétricos de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ na entrada de alimentação da máquina ferramenta com a utilização do Analisador de Energia AEMC modelo PowerPad 3945B.

A Figura (5b) apresenta o aparato para aquisição dos esforços de corte da Fresadora CNC PETRUS 50100R, fabricada pela DebMaq, com comando numérico Heidenhain. A potência total instalada é de 12,5 CV, a rotação máxima do eixo árvore de 8000 rpm, a velocidade máxima de deslocamento da mesa é de 10 m/min.

Os esforços de usinagem foram aferidos à frequência de amostragem de 1 kHz via comunicação do software do fabricante Kistler®, um Condicionador de Sinais Nexus® e o dinamômetro Kistler® 9265B com módulo de distribuição Kistler® 5407A.

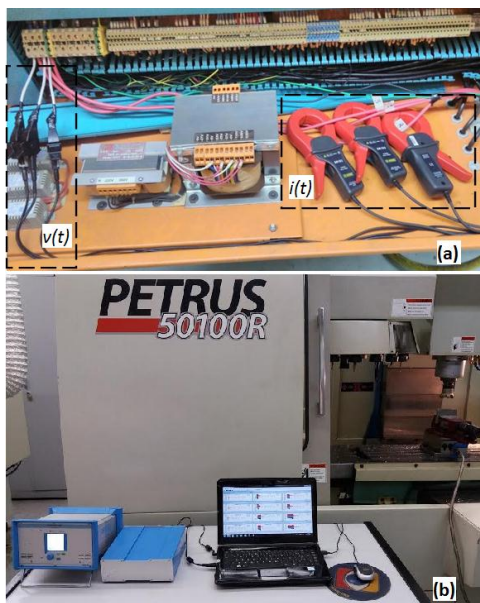


Figura 5. Aparato Experimental: aquisição de corrente e tensão (a), aquisição dos esforços de corte (b).

Foi utilizada uma fresa de faceamento fabricada pela Sandvik, codificada por R210-063Q27-14M. Montaram-se insertos novos de metal duro do mesmo fabricante, código R210-14 05 12M-PM 1030, com cobertura PVD tipo GC1030. A sua geometria tem o raio de arredondamento da ponta da ferramenta r_η medindo 1,2mm, ângulo de posição positivo χ_r de 10° e o ângulo de folga α_o de 15°. A Figura (6) apresenta uma representação genérica da ferramenta utilizada.

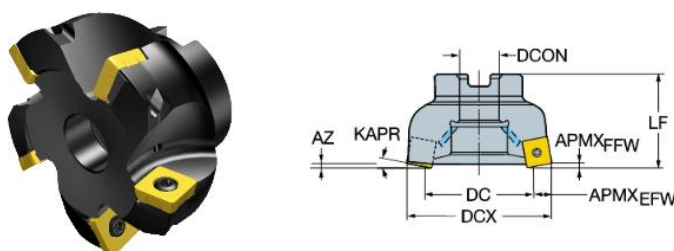


Figura 6. Fresa de faceamento CoroMill® 210 (Sandvik, 2016)

Quanto ao material usinado, trata-se de uma amostra de aço inoxidável martensítico, endurecido por precipitação, solubilizado e envelhecido identificado por ABNT PH 13 8Mo (S13800), com 25mm de largura de forma que a ferramenta, com diâmetro de corte de 39 mm, não a usinou em cheio. A Tabela (1) mostra a composição química fornecida pela fabricante, Villares Metals.

Tabela 1: Composição do aço Inoxidável ABNT PH 13 8Mo
(Catálogo de Aços Inoxidáveis da Villares Metals, 2017)

Subst.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Outros: Al
(% em peso)	≤ 0,045	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,01	≤ 0,002	8 a 8,5	8 a 8,5	2 a 2,5	1,1

Com a montagem do aparato experimental, definiram-se os experimentos por meio do Planejamento Fatorial Completo $2k$ com intuito de analisar e quantificar os efeitos de significância das k variáveis independentes, ou seja, os parâmetros de profundidade a_p , avanço por aresta f_z e velocidade de corte v_c . Com dois níveis definidos as variáveis codificadas em fatores, apresentados na Tab. 2. e Tab. 3 respectivamente. Vale ressaltar que a tomada de decisão acerca dos parâmetros foi baseada nas recomendações do fabricante da ferramenta de corte.

Tabela 2: Variáveis de entrada no processo de fresamento.

	Parâmetros de Corte		
	v_c (m/min)	f_z (mm/aresta)	a_p (mm)
Valor Mínimo	70	0,5	0,1
Valor Máximo	140	1	0,2

Tabela 3: Níveis codificados para os fatores.

	Níveis Codificados		
	x_1	x_2	x_3
Valor Mínimo	-1	-1	-1
Valor Máximo	+1	+1	+1

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela (4) apresenta os resultados de Força de Usinagem F_y , da parcela de potência distorciva D , do sistema submetido a distorções harmônicas de corrente e da Energia consumida durante a usinagem E_{usi} . Optou-se por apresentar a Energia consumida em VAh, tendo em vista a grande predominância da parcela distorciva de potência $D(VA)$ sobre as componentes de potência ativa $P(W)$. Destes resultados, destaca-se a segunda variável resposta D por não apresentar significância ao nível de 5%. Portanto, em todos os ensaios, a alteração dos parâmetros de corte que submeteu a máquina ferramenta a diferentes níveis de força de usinagem, não estabeleceu significância para os efeitos, principal e de interação, na potência distorciva.

Tabela 4: Respostas avaliadas durante os ensaios com as condições de entrada estabelecidas.

Ensaio	v_c [m/min]	f_z [mm/d]	a_p [mm]	F_y	$D(VA)$	E_{usi} (VAh)
1	70	0,5	0,1	232,23	609,80	179,55
2	140	0,5	0,1	200,14	776,99	205,87
3	70	1	0,1	282,06	663,03	226,28
4	140	1	0,1	318,40	814,02	241,76
5	70	0,5	0,2	373,81	719,83	259,15
6	140	0,5	0,2	362,00	834,58	275,45
7	70	1	0,2	544,24	688,36	291,66
8	140	1	0,2	577,22	945,53	314,65

A Figura (7) apresenta, de forma gráfica, o consumo de energia das três fases da máquina ferramenta, que compõem as componentes de E_{usi} , indicadas na Tab. (4), para oito ensaios. A fase direcionada à alimentação do eixo árvore é identificada como 'E2'. Nota-se que a mudança de níveis provocou aumento do consumo de energia e, que o maior consumo é referente ao CNC e aos dispositivos auxiliares na fase 'E3', seguida do consumo referente aos motores acionadores dos fusos da mesa da fresadora. Os resultados são coerentes, como observado por Carvalho e Gomes (2015) no consumo elétrico de um centro de usinagem.

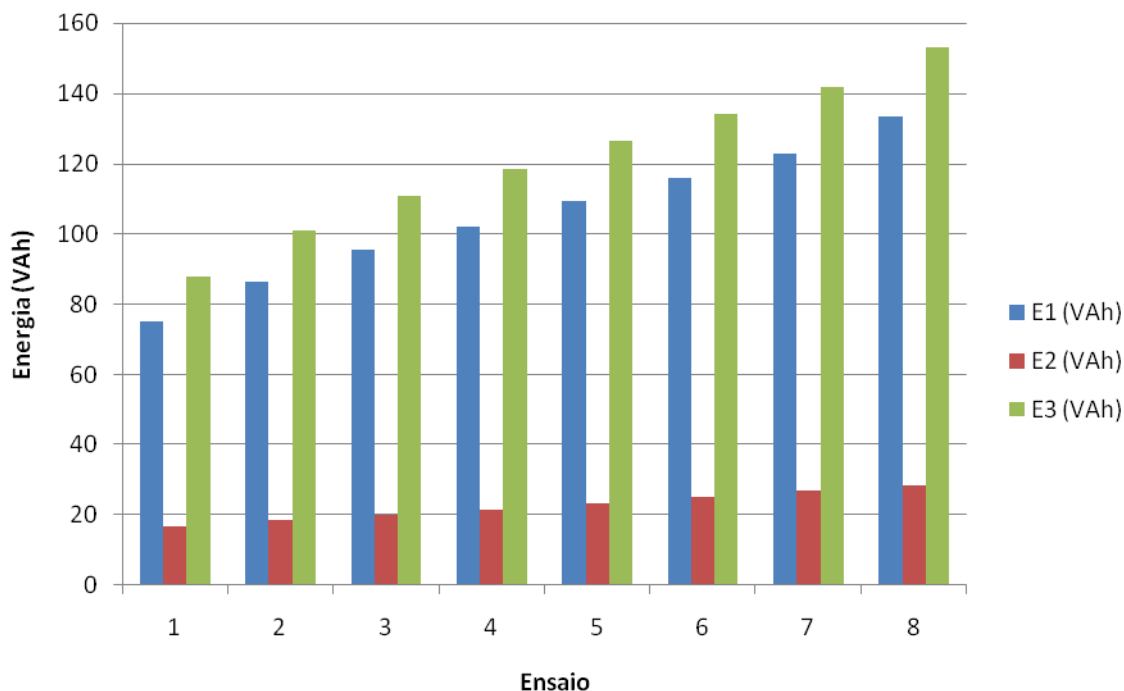


Figura 7. Consumo de energia elétrica nas três fases da máquina-ferramenta.

A Figura (8) esboça os resultados obtidos nos ensaios de força de usinagem para as três direções. Nota-se que o maior nível de forças é predominantemente no eixo Z, ou seja, devido à força de apoio. Segundo Da Silva *et al* (2011), em um estudo sobre a formação de rebarba para este material, o aparecimento de marcas de avanço mesmo nas regiões de tempo inativo, onde não ocorre cisalhamento, é atribuído à elevada recuperação elástica do material, ainda que com baixa profundidade de corte na região já cisalhada, pressiona o material. Portanto, evidencia-se que a recuperação elástica do material ocasione elevadas amplitudes de força de apoio. Entretanto, esta força não teve relação ao aumento do consumo energia elétrica.

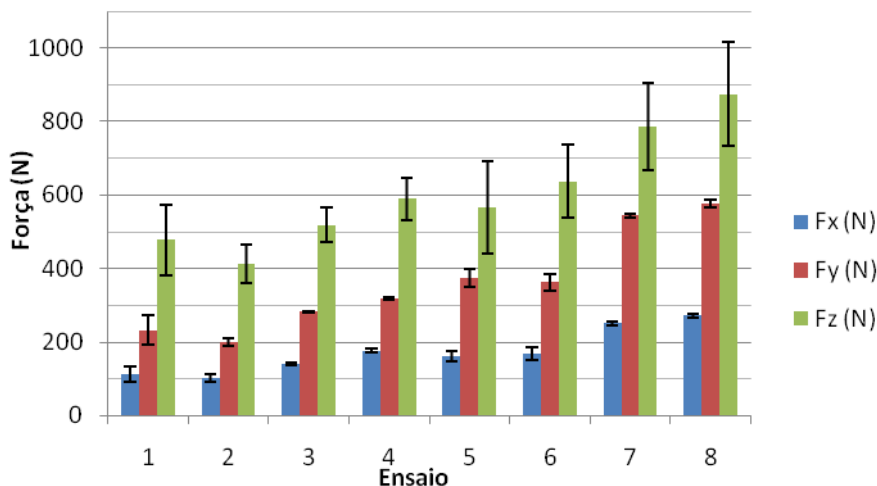


Figura 8. Amplitude dos esforços de corte nos três eixos de trabalho.

A Figura (9a) apresenta os histograma de efeitos da força de usinagem enquanto que a Fig. (9b) o consumo energético equivalente. Observou-se significância nos efeitos principais de avanço por dente f_z e da profundidade de corte a_p nos resultados obtidos de força de Usinagem F_y . Com base nos dados da Tab. (4) nota-se que o aumento de nível destes parâmetros de corte implica no aumento da força de usinagem, que é confirmada pelo histograma da Fig. (9a). Para Trent e Wright (2000), os aumentos do avanço e da profundidade de corte aumentam as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário do material durante a usinagem, conseqüentemente, a força de usinagem eleva-se praticamente de maneira linear.

Quanto aos efeitos da mudança de níveis nos parâmetros de corte no consumo de energia, nota-se que houve significância apenas para a profundidade de corte a_p .

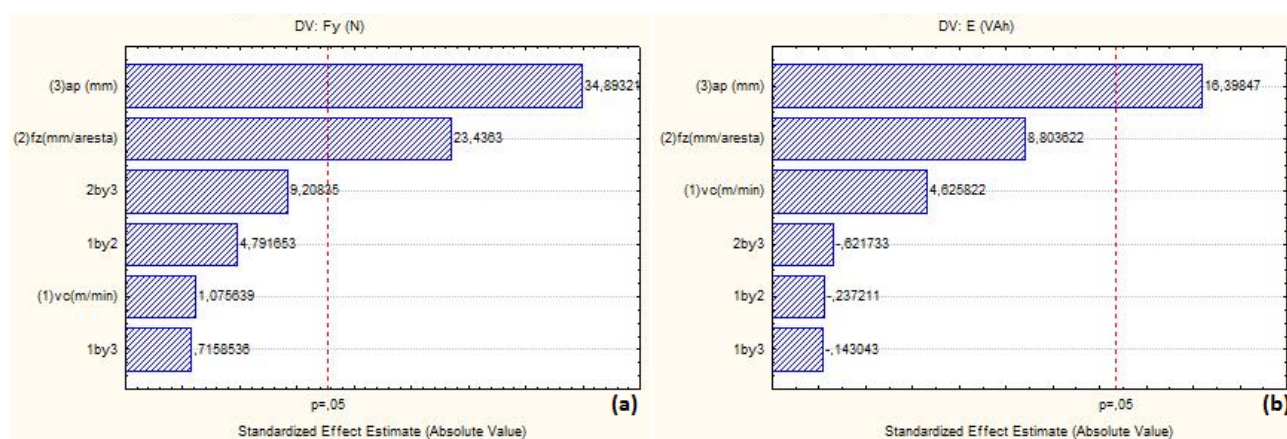


Figura 9. Histograma de Efeitos: força de usinagem F_y (a), consumo energético (b)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os resultados obtidos e discutidos no trabalho, listam-se as seguintes considerações finais:

- A baixa usinabilidade do aço inoxidável PH13 8Mo foi traduzida na maior amplitude de forças de apoio F_z em todos os ensaios que, no entanto, não culminou no aumento do consumo de potência elétrica significativamente.
- A mudança de níveis dos parâmetros de corte no ensaio não influenciou o incremento da parcela de potência distorciva devido às perturbações harmônicas;
- Para o melhor entendimento do comportamento da potência distorciva, deve-se criar um método para identificação de ordens harmônicas;
- O parâmetro de corte com maior influência nos valores de força de usinagem foi a profundidade de corte, seguida da velocidade de avanço.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Pesquisas em Processos de Fabricação (NUPEF-IFG), sobretudo com a parceria firmada junto ao Núcleo de Estudos Experimentais (NExT-IFG) pelas orientações na aquisição dos dados de potência elétrica e pela presteza de ceder os equipamentos para a execução.

6. REFERÊNCIAS

- Barvosa, P.A.; Carneiro, M. B. ; Samad, R. E. ; Vieira Junior, N. D. ; Machado, I. F. ; Machado, A. R. ; Vilar, R. ; Rossi, W., "Estudo preliminar da influência da textualização por laser de pulsos ultracurtos na força de usinagem." In: 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015, Salvador. 8ºCOBEF - Anais do Congresso Brasileiro de Fabricação, 2015
- Castilho, Denis, and Tadeus Alencar Arrais. "Eletrificação e modernização do território em Goiás-Brasil." http://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cCastilho_Electrificacao.pdf. Acesso em: 21 dez. 2016. Vol. 10. 2013.
- Carvalho, H. M.; Gomes, J. de Oliveira. Proposta de Método de Análise da Eficiência Energética de Máquinas-Ferramenta. Anais 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, Brasil: 2015.
- Da Silva, L. C.; Mota, P. R. ; Machado, A. R., "Comportamento dimensional das rebarbas de saída no fresamento de faceamento do aço inoxidável PH 13 8Mo" In: 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 2011, Caxias do Sul-RS. publicações do 6º COBEF, 2011.
- De la Rosa, Francisco., "Harmonics and power systems", CRC press, 2006.
- Diniz, A. E; Marcondes, F. C; Coppini, N. L., 2006, "Tecnologia da usinagem dos materiais", 5 ed., Editora Artliber, São Paulo, Brasil, pp. 255.
- Gennari Junior, W.; Machado, A. R., "Melhorias na usinabilidade dos aços inoxidáveis". Máquinas e Metais, São Paulo, n. 404, p. 84-98, 1999.
- Machado, A. L; Abrão, A. M; Coelho, R. T; Silva, M. B., 2011, "Teoria da usinagem dos metais", 2 ed., Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 371.
- Melo, P. F.; Annuziati, R. C. ; Romaneli, E. F. ; Gules, R., "Development and implementation of a three phase active filter." In: IX Induscon, 2010, São Paulo. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Application - Induscon, 2010.

- Moraes, P. H. F.; Magalhães, A. S. ; Ferreira, A. F. ; Paiva, J. R. B. ; Alves, A. J. ; Calixto, W. P. ; Domingos, J. L. ; Abraão, P. J., "Synchronous compensation versus capacitive compensation for reactive power in industrial systems subjected to harmonic distortion." In: 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016. p. 1.
- Nascimento, E. O.; Oliveira, L. N., "Sensitivity Analysis of Cutting Force on Milling Process using Factorial Experimental Planning and Artificial Neural Networks." Revista IEEE América Latina, v. 14, p. 4811-4820, 2016.
- Ortmann, M.; Mussa, S. ; Heldewein, M., "Three-phase Multilevel PFC Rectifier Based on Multi-State Switching Cells.", IEEE Transactions on Power Electronics, v. PP, p. 1-1, 2014.
- Silva, A. L. V. da C. e Mei, P. R., "Aços e Ligas Especiais.", 3º Ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2010.
- VILLARES METALS. AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO. Catálogo Eletrônico, Sumare-SP. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Endureciveis-por-Precipitacao-PH/N4534-PH13-8Mo-UNS-S13800-WNr.-1.4534>> Acesso em: 10 dez 2016.
- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989, "The Development of Zonal Models for Turbulence", Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.
- Clark, J.A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Coimbra, A.L., 1978, "Lessons of Continuum Mechanics", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 428 p.
- Lee, Y.B., 2003, "Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media", Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- Soviero, P. A. O. and Lavagna, L. G. M., 1997, "A Numerical Model for Thin Airfoils in Unsteady Motion", RBCM- J. of the Brazilian Soc. Mechanical Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 332-340.
- Sparrow, E. M., 1980, "Forced Convection Heat Transfer in a Duct Having Spanwise-Periodic Rectangular Protuberances", Numerical Heat Transfer, Vol. 3, pp. 149-167.
- Trent, E. M., Wright, P. K., 2000, "Metal Cutting", 4th Edition, Butterworth Heinemann.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS CUTTING FORCES AND ELECTRIC POWER CONSUMPTION IN MACHINE TOOLS

Paulo Vinícius da Silva Resende, paulo.vinicius@ifg.edu.br¹

Aylton José Alves, aylton.alves@ifg.edu.br²

Ildeu Lúcio Siqueira, ildeu.siqueira@ifg.edu.br¹

Silane Neves da Silva, silanesns@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Goiás - NUPEF, Rua 75, 46 - Setor Central, Goiânia - GO, 74055-110

²Instituto Federal de Goiás - NexT, Rua 75, 46 - Setor Central, Goiânia - GO, 74055-110

Resumo: *The cost of electricity in the machining industry represents 1/5 of the full process. The choose of cutting parameters is based of manufacturer's recommendations frequently. This paper approach the cutting forces and electrical consumption to measure the most significant variables among them axial depth of cut, feed per tooth and cutting speed on milling process.*

Palavras-chave: *Milling, Eletrical Consupction, Cutting Forces.*