

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA CORRENTE ELÉTRICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO AÇO ABNT 1045

Tiago Francisco Teles de Sousa e Silva

Patrick Abreu de Oliveira

Marcos Guilherme Carvalho Braulio Barbosa

Raphael Lima de Paiva

Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Ininga, CEP 64.049-550, Teresina – PI
tiagoteles-18@hotmail.com; patrick.abreu@live.com; marcosguilherme@ufpi.edu.br; raphaellimap@ufpi.edu.br

Resumo. Um método para monitorar processos de usinagem consiste em analisar a potência elétrica do motor das máquinas-ferramenta durante a operação de corte. Dentre as formas para esta análise, a medição da corrente elétrica nas fases do motor se destaca por ser uma opção minimamente invasiva e facilmente aplicável. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo medir a corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta durante o processo de torneamento, analisando a influência dos parâmetros de corte nesta variável de saída. Para isto foram realizados ensaios experimentais de torneamento cilíndrico externo do aço ABNT 1045 com ferramenta de metal duro. Foram testados dois níveis de velocidade de corte (121 m/min e 184 m/min) e três níveis de avanço (0,1138 mm/rev, 0,1392 mm/rev e 0,1772 mm/rev) e profundidade de corte (0,25 mm, 0,50 mm e 0,75 mm). A corrente elétrica da máquina-ferramenta foi medida através de um sistema montado com um sensor por Efeito Hall e um microcontrolador Arduino ATmega 2560. Os resultados mostraram que a corrente elétrica aumentou com os parâmetros de corte testados de forma estatisticamente significativa. O parâmetro velocidade de corte foi a variável que apresentou maior nível de significância nos resultados, seguido pela profundidade de corte e avanço, respectivamente.

Palavras chave: Usinagem. Torneamento. Corrente Elétrica. Parâmetros de Corte. Aço ABNT 1045.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem, segundo Machado, *et al.* (2011), é um processo de fabricação paradoxalmente simples e complexo ao mesmo tempo, em que se produzem peças por meio da remoção do excesso de material na forma de cavacos para obtenção de formas e dimensões predeterminadas. A usinagem é considerada o processo de fabricação mais difundido globalmente (Trent e Wright, 2000).

Segundo Shaw (2005), é difícil prever o desempenho de uma dada operação de usinagem, dada a característica primordialmente prática do processo, em especial considerando as intensas deformações plásticas e elevadas taxas de deformação as quais são submetidas a peça (Black, 1989). Machado, *et al.* (2011) explicam que diante dos inúmeros parâmetros de entrada nos processos de usinagem, existem inúmeras possibilidades de resultados, sendo necessárias ações para lidar com esta complexidade como, por exemplo, a análise do processo com experimentação. Neste contexto, o monitoramento dos processos de usinagem é fundamental para atingir melhores resultados na fabricação de um dado componente.

Weng, *et al.* (2017) destacam que uma das formas mais relevantes de monitoramento dos processos de usinagem se dá por meio da análise dos esforços de corte, pois eles afetam diretamente os resultados do processo no qual estão envolvidos, como a integridade superficial da peça e/ou a vida-útil da ferramenta utilizada. Os mesmos autores afirmam ainda que por conta dos complexos fenômenos que ocorrem na interface cavaco-ferramenta, os meios experimentais são um método mais assertivo para a verificação dos esforços de corte envolvidos no processo, cujo estudo se faz necessário para, por exemplo, o cálculo da potência requerida para determinada operação e/ou a seleção apropriada de parâmetros de corte.

A análise experimental dos esforços de corte pode ser realizada por meio de diferentes metodologias, sendo a mais comum aquela com a utilização de dinamômetros, equipamentos altamente dispendiosos e de utilização complexa, que necessitam ser acoplados e fixados à máquina-ferramenta, o que os torna consideravelmente invasivos ao processo e necessitando de condições operacionais específicas para a obtenção de resultados satisfatórios (Stephenson e Agapiou, 2016).

Como alternativa aos dinamômetros, Stein e Shin (1986) concluíram que os parâmetros elétricos do motor principal da máquina-ferramenta também podem ser utilizados como meio de observação do desempenho do processo de usinagem. Estes autores verificaram que a variação da corrente do motor elétrico é proporcional à variação do torque do eixo-árvore

da máquina-ferramenta e, por consequência, à força de usinagem (esforços de corte) no processo de torneamento, o que leva à relação entre a potência elétrica e a potência mecânica requeridas.

Segundo Braga (1992), a potência mecânica de usinagem pode ser experimentalmente medida através do sensoramento de tensão e corrente elétricas dos motores de acionamento da máquina-ferramenta, levando-se em consideração que a potência mecânica necessária para a execução de cada processo de usinagem é proporcional aos parâmetros elétricos de potência e corrente envolvidos nos mesmos. O mesmo autor destaca ainda que o método de sensoramento de parâmetros elétricos apresenta vantagens interessantes para o estudo dos esforços de corte, como a relativa facilidade de aplicação e medição por ser uma metodologia menos invasiva, versátil e potencialmente mais acessível do ponto de vista financeiro, em especial se comprado ao uso de dinamômetros.

Li (2005) desenvolveu um método de monitoramento de usinagem no qual, por meio do sensoramento da corrente elétrica do motor da máquina e da análise matemática dos coeficientes de força específica de corte em cada eixo, pode-se mensurar os esforços de corte. O autor realizou experimentos em uma máquina com controle numérico computadorizado (CNC) e utilizou ao mesmo tempo um dinamômetro para a comparação dos resultados. Segundo o estudo, o método possibilitou medições dos esforços de corte nos eixos tangencial, axial e radial, com erros menores que 10%, 5% e 25%, respectivamente, se comparado com os valores obtidos com o uso do dinamômetro. O autor concluiu então que o método de sensoramento de corrente tem desempenho e resultados robustos, além de baixo custo e alta aplicabilidade para a indústria.

Costa (1995) analisou a corrente elétrica da máquina-ferramenta, com auxílio de sensor de efeito Hall, no torneamento do aço 4340 com ferramenta de metal duro, sob diferentes condições de corte. O autor observou que a corrente elétrica aumentou com o comprimento de corte, independentemente da velocidade de corte e avanço utilizados, apresentando valores bem altos no fim de vida da ferramenta. Dessa forma, o autor concluiu que a análise da corrente elétrica da máquina-ferramenta é um bom parâmetro para estabelecer o fim de vida da ferramenta no processo de torneamento.

Patel e Patel (2012) observaram o efeito da variação dos parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na potência requerida do motor da máquina-ferramenta por meio do sensoramento elétrico com o uso de wattímetros, na operação de torneamento de compósitos de matriz metálica (MMC), formados por alumínio 6063 e carbeto de titânio (TiC), com ferramenta de diamante policristalino (PCD). Segundo os resultados do estudo, a potência requerida aumentou de acordo com o aumento dos parâmetros estudados, e através de análise de variância (ANOVA) realizada, os autores concluíram que a velocidade de corte foi a variável de entrada que teve maior influência na potência elétrica, seguido pelo avanço. A profundidade de corte apresentou efeito mais discreto no aumento da potência requerida pelo motor.

Neste contexto, considerando a importância do monitoramento dos processos de usinagem e do potencial associado às análises dos parâmetros elétricos das máquinas-ferramentas durante o processo de corte, este trabalho tem como objetivo medir a corrente elétrica de uma das fases do motor elétrico trifásico da máquina-ferramenta durante o processo de torneamento do aço ABNT 1045, utilizando um sistema de baixo custo montado com sensor de Efeito Hall e Arduino, analisando a influência, com ferramentas estatísticas, dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) nesta variável de saída.

2. METODOLOGIA

Os ensaios experimentais de torneamento cilíndrico externo foram realizados em um torno mecânico horizontal modelo TVK-1660 ECO da fabricante Veker, com motor elétrico do eixo-árvore de 3,3 kW de potência nominal. Foi utilizada uma ferramenta de corte com inserto de metal duro da fabricante Lamina Technologies, designação ISO CCMT 09T304 NN: ângulo de ponta de 80°, ângulo de folga de 7°, comprimento da aresta de corte de 9 mm, espessura de 3,97 mm e raio de ponta de 0,4 mm, indicada para uso de propósito geral. O material usinado nos ensaios experimentais foi o aço ABNT 1045, que possui aplicação relevante na fabricação de componentes de uso geral na indústria mecânica e apresenta dureza entre 180 HB e 300 HB (Sousa, 2016). Foram utilizados corpos de prova de geometria cilíndrica de 50 mm x 100 mm (diâmetro externo x comprimento).

Os parâmetros velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) foram utilizados como variáveis de entrada para os ensaios experimentais, seguindo o planejamento fatorial completo conforme especificado na Tab. 1. Os valores de v_c , f e a_p foram selecionados de acordo com a recomendação do fabricante da ferramenta para usinagem do material em questão. O comprimento usinado foi padronizado em 50 mm para todos os ensaios, os quais foram realizados a seco (sem aplicação de fluido de corte).

A variável de saída analisada neste trabalho foi a corrente elétrica durante o processo. Ela foi medida através de um conjunto composto por um microcontrolador Arduino ATmega 2560 com circuito eletrônico para aquisição de corrente elétrica e sensor de Efeito Hall não invasivo com faixa de medição de 0-100 A, modelo SCT-013-000, conforme metodologia utilizada por De Paiva e Barbosa (2018). O sensor foi montado em uma das fases do motor elétrico trifásico da máquina-ferramenta, e os sinais obtidos pelo sensor foram condicionados pelo microcontrolador e exportados a um computador através do programa PLX-DAQ para uma planilha Excel, onde os valores de corrente (valor RMS) em função do tempo foram registrados. Na Figura 1 é mostrado o esquema geral para medição da corrente elétrica durante os ensaios de torneamento, assim como a representação do circuito de aquisição de sinais.

Tabela 1. Planejamento experimental

Ensaio	v_c [m/min]	f [mm/rev]	a_p [mm]	Ensaio	v_c [m/min]	f [mm/rev]	a_p [mm]
1	121	0,1138	0,25	10	184	0,1138	0,25
2			0,50	11			0,50
3			0,75	12			0,75
4		0,1392	0,25	13		0,1392	0,25
5			0,50	14			0,50
6			0,75	15			0,75
7		0,1772	0,25	16		0,1772	0,25
8			0,50	17			0,50
9			0,75	18			0,75

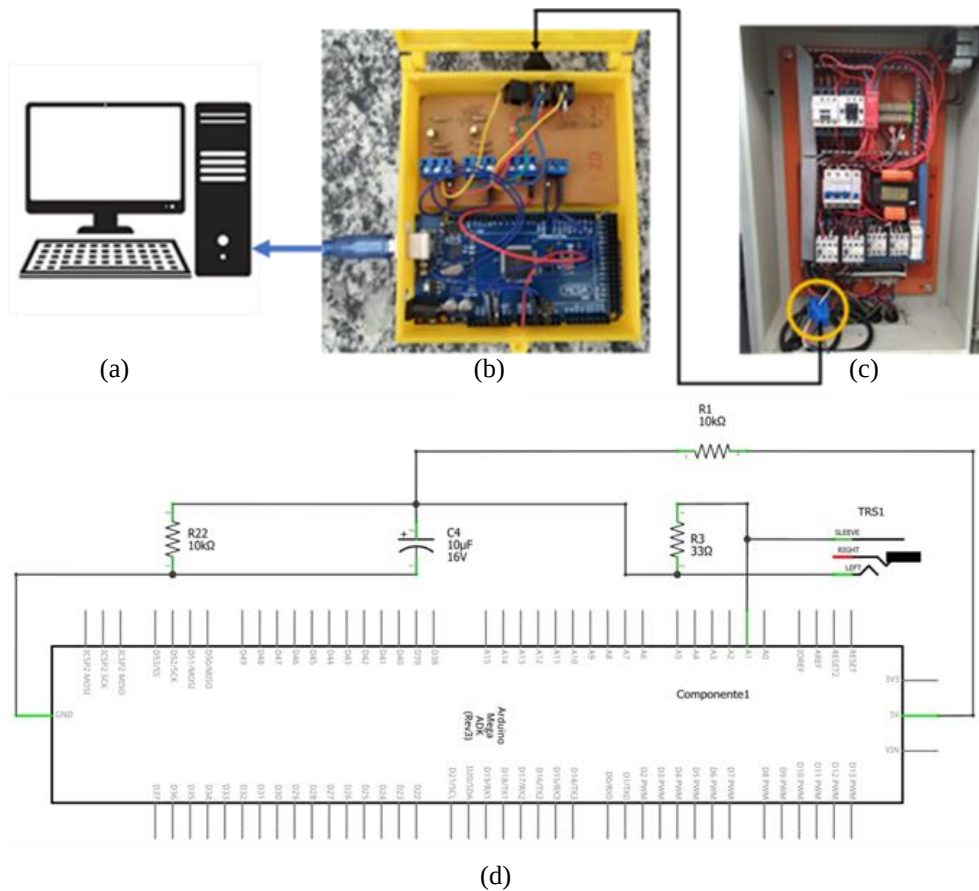


Figura 1. (a) Computador para aquisição de sinais; (b) Microcontrolador Arduino e circuito elétrico; (c) Painel elétrico da máquina-ferramenta com o sensor de Efeito Hall instalado em destaque; (d) Esquema do circuito de aquisição de sinais de corrente elétrica

A partir dos dados de corrente elétrica obtidos durante os ensaios experimentais, foram calculadas médias e o desvio padrão para as diferentes condições de corte, considerando o intervalo de tempo correspondente ao processo de corte do material, como exemplificado na Fig. 2. Além disso, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de efeitos principais para avaliar os resultados do ponto de vista estatístico, a fim de verificar a significância da variação de cada parâmetro de corte estudado nos resultados de corrente elétrica.

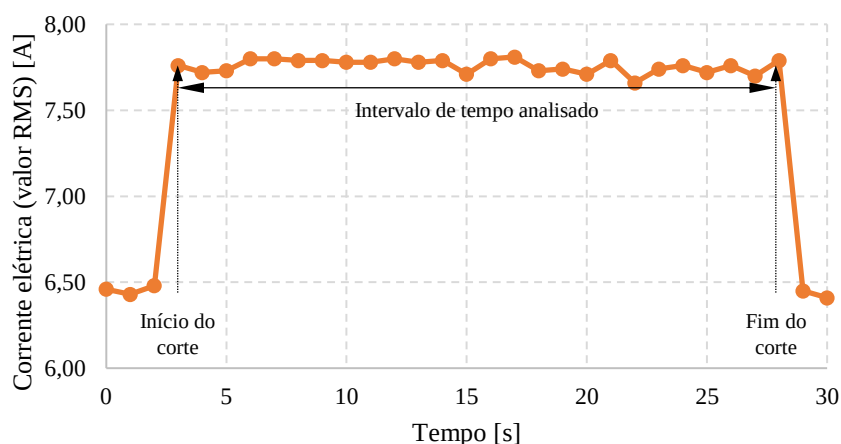


Figura 2. Sinal de corrente elétrica obtido para o ensaio 11 ($v_c = 184$ m/min; $f = 0,1138$ mm/rev; $a_p = 0,5$ mm)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 são apresentados os valores médios de corrente elétrica (valor RMS) medidos nos ensaios experimentais de torneamento para as velocidades de corte (v_c) de 121 m/min e 184 m/min, respectivamente, em função de profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Conforme pode ser observado da Fig. 3, a corrente elétrica aumentou com o aumento dos parâmetros de corte, similar ao observado por Patel e Patel (2012).

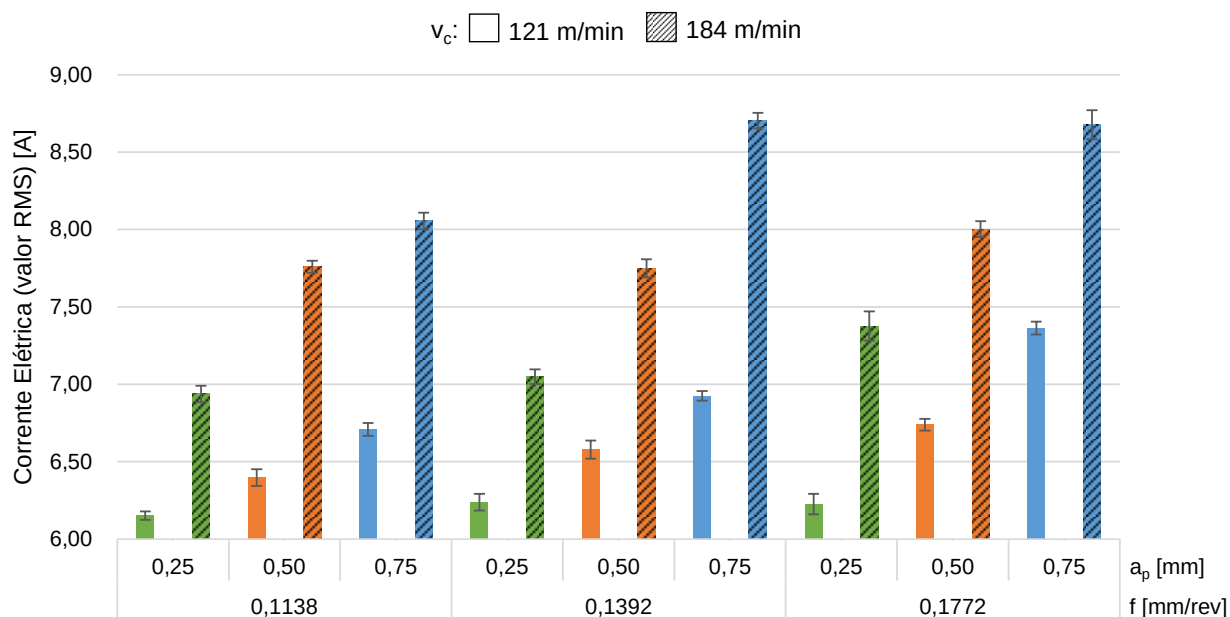


Figura 3. Resultados de corrente elétrica (valor RMS) dos ensaios experimentais realizados neste trabalho

A análise de variância produziu os resultados apresentados na Tab. 2, que demonstram que, para as condições utilizadas neste trabalho, todos os fatores analisados (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) foram estatisticamente significativos para um intervalo de confiabilidade de 95%, uma vez que o valor P obtido para cada um dos fatores foi inferior a 0,05.

Tabela 2. Resultados da análise de variância

Fonte	Graus de Liberdade	Valor F	Valor-P	Nível de significância (1-p)
Efeitos principais				
Velocidade de Corte [m/min]	1	170,25	0,000	100,0%
Avanço [mm/rev]	2	5,97	0,016	98,4%
Profundidade de Corte [mm]	2	44,07	0,000	100,0%

Ainda de acordo com a Tab. 2, considerando o valor F, observa-se que a velocidade de corte foi a variável de entrada com maior influência sobre a corrente elétrica, seguida pela profundidade de corte e avanço, respectivamente. Os resultados da influência dos parâmetros de avanço e profundidade de corte encontrados neste estudo são divergentes em relação aos observados por Patel e Patel (2012), que observaram uma maior influência do avanço em comparação à profundidade de corte. No entanto, é importante salientar que a variação entre os níveis de avanço e profundidade de corte testados por Patel e Patel (2012) foram semelhantes. Dessa forma, tal divergência pode ser explicada pela grande diferença de variação entre os níveis de avanço e profundidade de corte utilizados no presente trabalho: enquanto a profundidade de corte aumentou em 100% e 50% (0,25 mm para 0,50 mm, e 0,50 mm para 0,75 mm, respectivamente), o avanço aumentou em apenas 22% e 27% (0,1138 mm/rev para 0,1392 mm/rev, e 0,1392 mm/rev para 0,1772 mm/rev, respectivamente).

Na Figura 4 são mostrados os gráficos de efeitos principais para cada parâmetro de corte analisado neste trabalho, apresentando a variação percentual no valor médio da corrente elétrica para cada variável de entrada, avaliando que o aparato utilizado para medição da corrente elétrica foi de fato sensível à variação dos parâmetros de corte avaliados (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte).

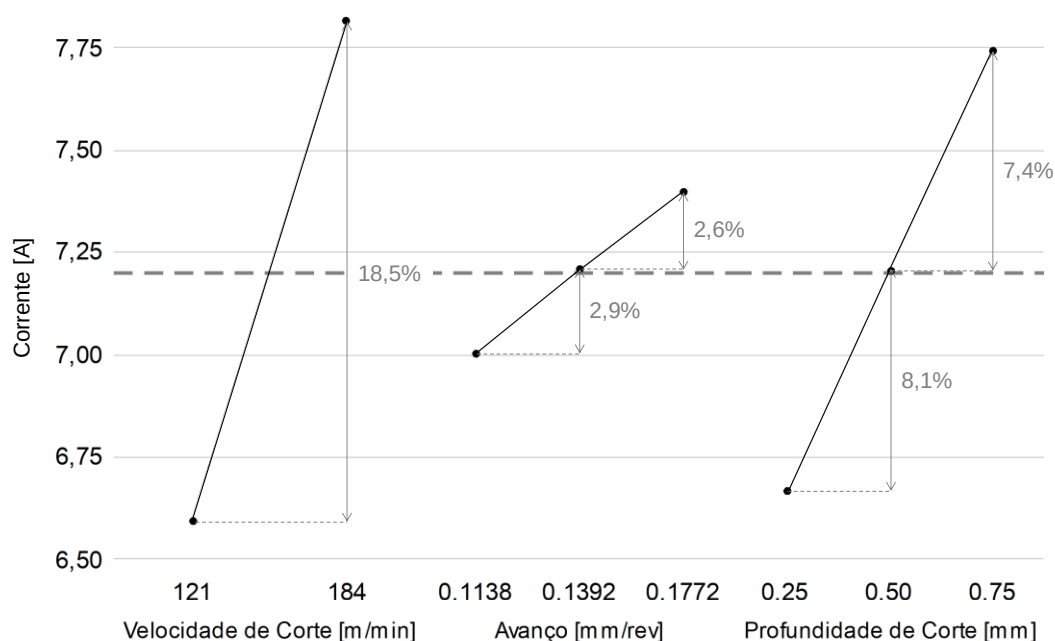


Figura 4. Gráfico de efeitos principais para a Corrente [A]

Avaliando o efeito do avanço na variável de saída, pode-se observar um acréscimo da corrente elétrica média com o aumento do avanço. Quando este parâmetro aumentou de 0,1138 mm/rev para 0,1392 mm/rev, o aumento na corrente elétrica teve uma média de 2,9%, enquanto o aumento no avanço de 0,1392 mm/rev para 0,1772 mm/rev resultou em um aumento de corrente com uma de média 2,6%, conforme observado na Fig. 4. De acordo com Machado, *et al.* (2011), os esforços de corte aumentam com o avanço, aumentando a potência mecânica envolvida no processo, que leva, consequentemente, ao crescimento da potência elétrica requerida, aumentando assim a corrente elétrica da máquina ferramenta conforme observado nos resultados deste trabalho.

O aumento da profundidade de corte dentro dos valores testados neste trabalho produziu um efeito crescente na variável de saída similar às demais variáveis de entrada estudadas. O gráfico de efeitos principais, Fig. 4, mostra que o aumento de 0,25 mm para 0,50 mm da profundidade de corte resultou em um acréscimo de corrente elétrica média de 8,1%, e entre 0,50 mm e 0,75 mm verificou-se uma elevação de 7,4% nos valores médios de corrente elétrica. De forma similar ao avanço, o aumento da corrente elétrica com a profundidade de corte pode ser explicado pelos maiores esforços envolvidos no processo durante a formação do cavaco, que são relacionados com o acréscimo da profundidade de corte, como descrito por Trent e Wright (2000), levando a uma maior força de usinagem, o que requer uma maior potência elétrica do motor da máquina-ferramenta para realização do processo de corte.

Em relação ao efeito da velocidade de corte nos resultados de corrente elétrica, observou-se um aumento da corrente elétrica média medida do motor da máquina-ferramenta com uma média geral de aumento de 18,5% entre os ensaios realizados com 121 m/min e aqueles realizados com 184 m/min, como verificado na Fig. 4. O aumento da corrente elétrica com a velocidade de corte está associado à maior potência elétrica requerida do motor, em decorrência da maior potência mecânica necessária para executar a operação com uma maior velocidade de corte. Este efeito também foi observado por

Costa (1995), que ainda destacou que a velocidade de corte é o parâmetro mais intimamente ligado ao aumento da potência mecânica requerida, pela relação direta entre potência, força e velocidade de corte.

Por fim, é importante ressaltar que, mesmo que a potência de usinagem possa ser calculada através dos parâmetros elétricos da máquina-ferramenta (corrente elétrica e tensão), Machado, *et al.* (2011) ressaltam que a relação entre potência mecânica e potência elétrica não é direta, uma vez que apenas a parte correspondente à potência elétrica ativa é utilizável pela máquina-ferramenta, e que esta é intimamente ligada ao fator de potência (defasagem entre os sinais de tensão e corrente elétrica), o qual varia com a corrente. Dessa forma, para estimar a potência mecânica através dos parâmetros elétricos da máquina-ferramenta, faz-se necessário a análise dos sinais de corrente, tensão e a defasagem entre eles (fator de potência). Da Costa, *et al.* (2017) observam ainda que a relação entre potência elétrica e mecânica está sujeita a outros fatores relacionados às perdas inerentes ao funcionamento do sistema, como as perdas elétricas do motor e o rendimento mecânico do sistema, além das relações de transmissão de torque e velocidade.

4. CONCLUSÕES

Dados os resultados deste trabalho, e a partir das análises realizadas sobre a medição de corrente elétrica com a variação dos parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, pode-se concluir que:

- O aparato para medição de corrente elétrica do motor do torno com uso do sensor de Efeito Hall combinado ao microcontrolador Arduino foi sensível às alterações nos parâmetros de usinagem estudados;
- A variação na velocidade de corte de 121 m/min para 184 m/min resultou, em geral, no um aumento da corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta durante o processo de corte em 18,5%;
- O aumento do avanço de 0,1138 mm/rev para 0,1392 mm/rev resultou em uma variação na corrente elétrica média durante os ensaios de 2,9%, enquanto para os ensaios com 0,1392 mm/rev e 0,1772 mm/rev a variação na média geral foi de 2,6%;
- O aumento na profundidade de corte de 0,25 mm para 0,5 mm promoveu um acréscimo na corrente elétrica média durante os ensaios na faixa de 4,00% a 11,84%, e entre os ensaios com 0,5 mm e 0,75 mm, houve um aumento entre 3,81% e 12,31%;
- Todas as variáveis de entrada avaliadas neste trabalho apresentaram valor p menor que 0,05, sendo, portanto, estatisticamente significativas para um intervalo de confiabilidade de 95%. A variável velocidade de corte foi o parâmetro que apresentou maior nível de significância nos resultados de corrente elétrica, seguido pela profundidade de corte e avanço.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí (UFPI) pelo apoio na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Black, J. T., 1989. "Introduction to machining process". *ASM Handbook: Machining*, Vol. 16, p. 1-4.
- Braga, D. U., 1992. *Monitoramento do processo de torneamento via parâmetros elétricos do motor da máquina*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Costa, C. E., 1995. *Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Da Costa, D.D., Rialto, A.C., Gussoli, M.K. e Guimarães, W.M., 2017. "Analysis of energy losses in the conventional turning process". In *Proceedings of the 9th Brazilian Congress of Manufacturing Engineering - COBEF2017*. Joinville, Brazil.
- De Paiva, R. L. e Barbosa, M. G. C. B., 2018. "Análise da Medição de Potência Elétrica da Máquina-Ferramenta no Processo de Furação". In *Anais do XXII Colóquio de Usinagem*, Uberaba, Brasil.
- Li, X., 2005. "Development of Current Sensor for Cutting Force Measurement in Turning". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, p. 289-296.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e Silva, M.B., 2011. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Editora Blucher, São Paulo, 2ª edição.
- Patel, P. R. e Patel, V. A., 2012. "Effect of machining parameters on surface roughness and power consumption for 6063 Al alloy TiC composites (MMCs)". *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, p. 295-300.
- Shaw, M. C., 2005. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, 2nd ed.
- Sousa, F. G., 2016. *Avaliação da resistência à fadiga do aço ABNT 1045 com diferentes níveis de deformação residual e tratamento térmico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.
- Stein, J. L. e Shin, K.-C., 1986. "Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drives". *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 108, p. 289-295.

- Stephenson, D. A. e Agapiou, J. S., 2016. *Metal cutting theory and practice*. CRC press, Boca Raton, 3rd ed.
- Trent, E. M. e Wright P. K., 2000. *Metal Cutting*. Butterworth–Heinemann, Boston, 4th ed.
- Weng, J., Zhuang, K., Chen, D., Guo, S. e Ding, H., 2017. “An analytical force prediction model for turning operation by round insert considering edge effect”. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 128-129, p. 168-180.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON MACHINE TOOL ELECTRIC CURRENT ON EXTERNAL CYLINDRICAL TURNING OF ABNT 1045 STEEL

Tiago Francisco Teles de Sousa e Silva

Patrick Abreu de Oliveira

Marcos Guilherme Carvalho Braulio Barbosa

Raphael Lima de Paiva

Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Ininga, CEP 64.049-550, Teresina – PI
tiagoteles-18@hotmail.com; patrick.abreu@live.com; marcosguilherme@ufpi.edu.br; raphaellimap@ufpi.edu.br

Abstract. A method for monitoring machining processes is to analyze the electrical power of the machine tool spindle motor during cutting operation. Among the different techniques to perform this analysis, the measurement of the electric current of spindle motor phases stands out for being a minimally invasive and easily applicable option. In this sense, this work aims to measure the electric current of the machine tool spindle motor during turning process, analyzing the influence of cutting parameters on this output variable. Experimental tests of external cylindrical turning of ABNT 1045 steel were carried out with a carbide tool. Two levels of cutting speed (121 m/min and 184 m/min) and three levels of feed rate (0.1138 mm/rev, 0.1392 mm/rev and 0.1772 mm/rev) and depth of cut (0.25 mm, 0.50 mm and 0.75 mm) were tested. The electric current of the machine tool was measured using a system assembled with a Hall Effect sensor and an Arduino ATmega 2560 microcontroller. The results showed that the electric current increased with cutting parameters tested in a statistically significant way. The cutting speed parameter was the variable that showed the highest level of significance in the results, followed by depth of cut and feed rate, respectively.

Keywords: Machining, Turning, Electric Current, Cutting Parameters, ABNT 1045 Steel.

RESPONSIBILITY NOTICE

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