

MEDIÇÃO DE ESFORÇOS DE CORTE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO COM AUXÍLIO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS E MICROCONTROLADOR ARDUINO

Ana Katarina do Amaral Nunes, anakatarina@ufpi.edu.br¹
Viniciu Heros de Andrade Moreira, v.heros.andrade@gmail.com¹
Patrick Abreu de Oliveira, patrick.abreu@live.com¹
Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Ininga, CEP 64049-550, Teresina – PI.

Resumo: Os processos de remoção de material são amplamente utilizados na indústria metal mecânica, por garantir versatilidade e flexibilidade na produção de componentes, permitindo fabricar peças com uma enorme variedade de geometria e qualidade superficial. Em tais operações, o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte é de fundamental importância, dado que o controle dessas variáveis pode garantir que o processo seja realizado de forma a obter os melhores resultados no desempenho industrial, além de fornecer informações que auxiliam no dimensionamento de máquinas-ferramentas e na definição de outros parâmetros, como potência de corte, por exemplo. Dentre as técnicas para esta análise, a utilização de extensômetros elétricos se destaca por ser uma opção facilmente aplicável e de baixo custo. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo medir a força de corte no processo de torneamento, com auxílio de extensômetros elétricos e microcontrolador Arduino, bem como analisar a influência do avanço e profundidade de corte nesta variável de saída. Para isto, foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo do aço AISI 1045 com ferramenta de aço rápido (HSS). Foram testados dois níveis de avanço e de profundidade de corte. Para a realização dos testes, os elementos transdutores foram montados no bit de HSS na configuração de ponte de Wheatstone completa, cujo sinal de variação de resistência elétrica foi amplificado com auxílio do módulo HX711. A aquisição de dados do sistema foi realizada através do microcontrolador Arduino Uno e do software PLX-DAQ. Os resultados mostraram que a metodologia aplicada pode ser utilizada com eficiência dado que o comportamento do sinal adquirido dos extensômetros apresentou-se conforme é relatado na literatura, observou-se o aumento nos esforços de corte com o avanço e profundidade de corte.

Palavras-chave: Torneamento, Extensômetros, Arduino, Avanço, Profundidade de corte, Esforços de corte

1. INTRODUÇÃO

No setor metal-mecânico, os processos que envolvem a remoção de material na forma de cavaco são amplamente empregados. Brandão (2019) ressalta que todo componente mecânico tem, no mínimo, uma etapa de fabricação onde sua transformação ocorre por retirada de material na forma de cavaco. Na indústria, a larga utilização de processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida deve-se, em grande parte, por permitirem a obtenção de superfícies de diversas formas, relativos baixos valores de rugosidade da superfície e boa precisão dimensional cuja qualidade IT pode variar entre IT07 e IT11, a depender do processo de fabricação.

Dentre as diversas operações de usinagem, o processo de torneamento se destaca por seu uso bem difundido no qual, segundo Groover (2014), uma ferramenta monocortante remove material da superfície de uma peça que gira. A vasta gama de aplicações desse tipo de operação se deve a sua flexibilidade na produção de componentes mecânicos, permitindo fabricar peças com uma enorme variedade de geometrias (Brandão, 2019).

Na indústria moderna, a busca por melhoria da qualidade é contínua e, de acordo com Silva (2014), entre os processos que apresentam variáveis de estudo para melhoria, a usinagem é o que apresenta maiores desafios. Isto se deve ao fato de que em tais operações estão envolvidos diversos fatores e parâmetros que devem ser definidos cuidadosamente para obter-se um desempenho ideal com relação a tempo de fabricação, vida útil da ferramenta, esforços de corte, temperatura da ferramenta, entre outros.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), é de fundamental importância o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem, uma vez que estes afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias dimensionais apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. Além disso, Machado et al. (2015)

destacam a importância de verificar como os parâmetros de entrada envolvidos no processo exercem influência nas variáveis de saída como os esforços de corte, a fim de buscar uma forma para otimizar o processo.

Existem diversas técnicas para a medição de esforços de corte em operações de usinagem, entre elas pode-se citar a utilização de dinamômetros. De acordo com Liang et al. (2016), a maior parte dos dinamômetros comerciais para medição de esforços de corte em processos de usinagem em geral são baseados no método piezoelétrico. Estes dispositivos são equipados com transdutores piezoelétricos capazes de produzir um sinal elétrico (diferença de potencial) quando deformados por ação de uma força. No entanto, embora seu uso ofereça elevada precisão de medida, estes dispositivos apresentam alto custo devido à complexidade de construção e necessidade de amplificadores do sinal (Liang et al., 2016; Subasi et al., 2018).

Neste sentido, uma alternativa econômica para a medição dos esforços de corte é a utilização de extensômetros elétricos, os quais convertem deformação mecânica em variação de resistência elétrica. Os extensômetros são transdutores largamente utilizados em diferentes ramos da engenharia, especialmente na realização de ensaios não destrutivos para medidas de tensões. Dentre as características desejáveis dos extensômetros metálicos, destacam-se elevada precisão das medições, boa linearidade do sinal de saída, tamanho compacto, baixo custo e fácil aplicação sobre uma grande variedade de superfícies (Bindu e Vinod, 2015; Machado et al, 2015; Santos, 2018).

Silva et al. (2014) desenvolveram um dispositivo mecânico com função de porta ferramenta e célula de carga, comportando quatro extensômetros do tipo lâmina. A aquisição de dados foi feita a partir de um microcontrolador Arduino Mega 2560, amplificador para célula de carga e do software National Instruments Labview 2012. Os resultados obtidos a partir da utilização do dispositivo construído foram, de acordo com os autores, satisfatórios, demonstrando ser eficiente na medição da força de corte no processo de torneamento cilíndrico.

Silva e Vieira (2015) utilizaram um extensômetro elétrico associado a uma combinação de resistores (configuração de 1/4 de ponte de Wheatstone) e circuito regulador para medir força de corte durante torneamento do aço ABNT 1020 com bit de aço rápido. O extensômetro foi montado no bit e os autores observaram que os valores de força de corte medidos nos ensaios de torneamento foram próximos daqueles esperados segundo modelos analíticos, embora apresentando certa incerteza na medição.

Considerando a importância da medição de esforços de corte nos processos de usinagem, neste trabalho é apresentado um dispositivo para medição de força de corte no processo de torneamento com auxílio de extensômetros elétricos e microcontrolador Arduino. Além disso, este trabalho objetiva analisar a influência do avanço e profundidade de corte nesta variável de saída medida por tal dispositivo de baixo custo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de torneamento cilíndrico externo foram realizados em um torno mecânico horizontal, modelo TVK1660ECO, da fabricante Veker. Durante os ensaios foi utilizada uma ferramenta monocortante de aço rápido (HSS), de seção quadrada de 3/8" e 6" de comprimento (9,525 mm × 152,4 mm). O corpo de prova utilizado foi de aço AISI 1045, com dimensões de 100 mm de comprimento e 39 mm de diâmetro externo, e dureza na faixa de 190-210 HB. As variáveis de entrada para os ensaios foram os parâmetros avanço (f) e profundidade de corte (a_p), ambos testados em dois níveis: $f = 0,11$ mm/rot e $0,18$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm e $0,50$ mm. Ressalta-se que tais parâmetros de corte foram selecionados a fim de evitar o desgaste da ferramenta e maiores vibrações no sistema. Todos os ensaios foram realizados a seco (sem aplicação de fluido de corte) para evitar possíveis danos ao circuito elétrico do dispositivo, o qual não conta, ainda, com uma estrutura de proteção.

A variável de saída analisada neste trabalho foi a força de corte, medida com o auxílio do sistema de medição composto por extensômetros elétricos e sistema eletrônico para amplificação do sinal, com auxílio do microcontrolador Arduino UNO para aquisição e controle de dados. Foram utilizados 4 extensômetros elétricos, modelo BF350 – 3AA, cuja resistência elétrica é de 350Ω , possui formato unidirecional, tamanho de grade de 3 mm e fator de sensibilidade fornecido pelo fabricante de 2,1.

Os sensores foram montados no bit de aço rápido seguindo a configuração de ponte de Wheatstone completa para que a variação de tensão entre os terminais da ponte fosse máxima, garantindo uma maior sensibilidade para o sistema de medição. Foi utilizado um amplificador para célula de carga modelo HX711, com função de amplificar o sinal obtido e assim possibilitar a sua leitura pelo microcontrolador Arduino. Na Figura 1 são mostrados detalhes da montagem para o dispositivo utilizado nas medições de força de corte. Ressalta-se que o custo total para a montagem deste dispositivo foi de aproximadamente R\$ 300,00.

Antes dos ensaios, a ferramenta foi posicionada no castelo do torno com um comprimento em balanço de 80 mm. Ressalta-se que este comprimento em balanço é necessário para maximizar a deflexão da ferramenta, fazendo então possível a medição por esta metodologia. Após o posicionamento da ferramenta no castelo, foi realizada uma calibração com blocos cujas massas são conhecidas (0 kg, 0,5 kg, 1,0 kg e 2,0 kg) para levantar a curva de força, em Newtons, em função do sinal obtido pelos extensômetros conforme Figura 2(a). Vale ressaltar que o sinal obtido pelos extensômetros apresentou uma excelente linearidade ($R^2 > 0,99$) com a força.

O sinal obtido pelos extensômetros durante os ensaios foi exportado para uma planilha com auxílio do software PLX-DAQ. A região de corte (contato entre a peça e a ferramenta com remoção de cavaco) foi selecionada para análise, em que foram calculados os valores de média e desvio padrão para cada ensaio. Na Figura 2(b) é mostrado o sinal obtido para o ensaio com avanço de $0,11$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.

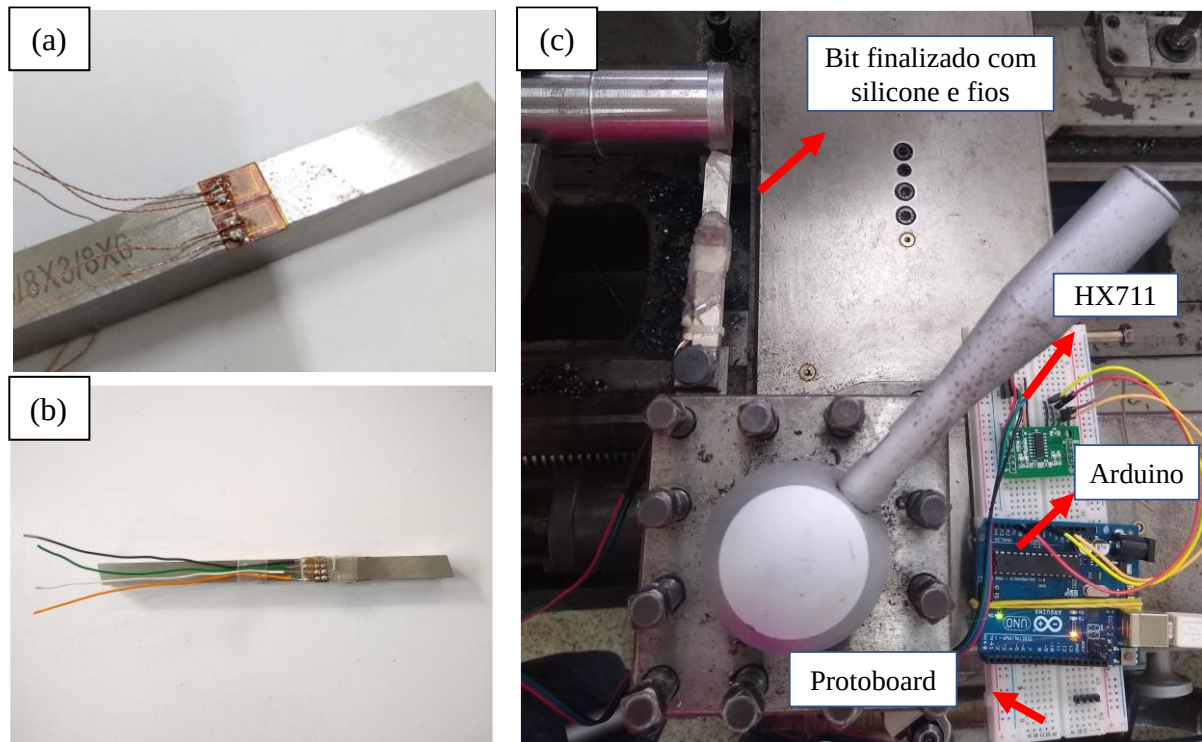


Figura 1. (a) Bit com os extensômetros colados. (b) Bit finalizado com os cabos. (c) Arranjo final dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

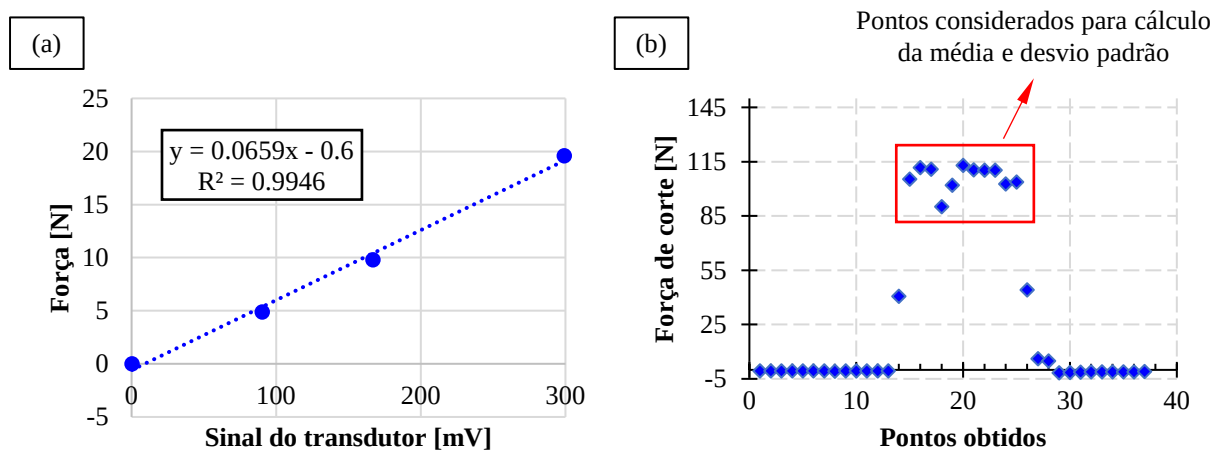


Figura 2. (a) Curva da força, em Newtons, em função do sinal obtido pelos extensômetros. (b) Sinal de força de corte, Newtons, obtido para o ensaio com $f = 0,11$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são mostrados os resultados de força de corte obtidos para cada uma das condições de corte utilizadas neste trabalho. Conforme pode ser observado na Figura 3, para um avanço (f) de 0,11 mm/rot e profundidade de corte (a_p) de 0,25 mm, a força de corte registrada foi de 106 N. Ao aumentar a profundidade de corte para 0,50 mm, mantendo constante o avanço, foi observado um aumento na força de corte, a qual passou a ser, em média, 194 N. Modificando os parâmetros de corte para $f = 0,18$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm, a força de corte obtida foi de 195 N. Por fim, para a condição de corte mais severa utilizada neste trabalho ($f = 0,18$ mm/rot e $a_p = 0,50$ mm), a força de corte medida durante os ensaios foi de 344 N.

Dessa forma, para a condição em que o avanço adotado foi de 0,11 mm/rot, ao aumentar o valor da a_p de 0,25 mm para 0,50 mm, observa-se um aumento expressivo na força de corte, de 83%, evidenciando uma proporcionalidade direta entre estas grandezas. Quanto aos ensaios cujo avanço utilizado foi de 0,18 mm/rot, foi possível observar a mesma tendência, com aumento percentual na força de corte de 76% quando a profundidade de corte aumentou de 0,25 mm para

0,50 mm. De modo análogo, analisando o aumento percentual nos valores de força sob diferentes condições de avanço e profundidade de corte constante, observa-se dos resultados deste trabalho que o aumento no avanço de $f = 0,11$ mm/rot para $f = 0,18$ mm/rot resultou em um aumento de 84% e 77% na força de corte para a_p de 0,25 mm e 0,50 mm, respectivamente.

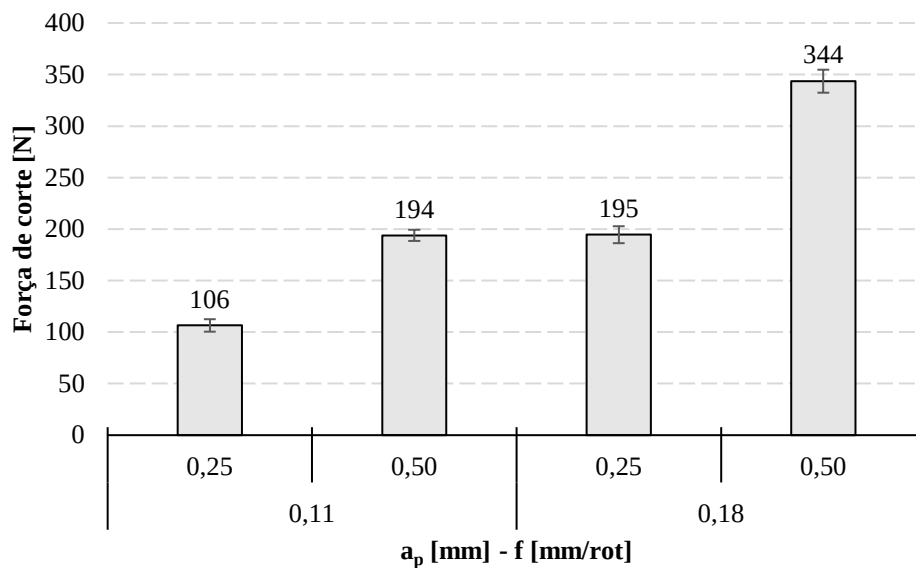


Figura 3. Força de corte obtida em função da profundidade de corte e avanços utilizados neste trabalho.

O aumento da força de corte com o avanço e profundidade de corte é uma tendência esperada no processo de torneamento. De acordo com Machado et al. (2015), o aumento destas variáveis de entrada promove um aumento na área total da secção de corte que, por sua vez, é diretamente proporcional à força de corte. Esta tendência também foi observada por Kuntoğlu e Sağlam (2019) no torneamento do aço AISI 1050. De acordo com os autores, maiores valores de avanço e profundidade de corte aumentam a área de corte, sendo necessário, portanto, maiores esforços de corte para remover o material.

Silva e Vieira (2015) mediram a força de corte durante o torneamento do aço ABNT 1020 com extensômetros elétricos e parâmetros de corte $v_c = 25$ m/min, $f = 0,3$ mm/rot e $a_p = 0,30$ mm. Os autores observaram que o sinal de força de corte durante o ensaio de torneamento oscilou entre 150 -350 N, apresentando valor médio em torno de 253 N. Em trabalho mais recente, Dos Santos et al. (2018) mediram os esforços de corte no torneamento do aço AISI 1045 com ferramenta de metal duro, utilizando como metodologia a aplicação de extensômetros elétricos montados no porta-ferramenta na configuração de ponte de Wheatstone completa. Para as condições de corte $v_c = 100$ m/min, $f = 0,2$ mm/rot e $a_p = 0,465$ mm, o valor da força de corte medida pelos autores foi de 238 N.

Comparando os resultados de Silva e Vieira (2015) e Dos Santos et al. (2018) com os obtidos neste trabalho, bem como ponderando as diferenças em termos de parâmetros de corte e/ou tipo de material, pode-se inferir que os valores de força de corte medidos pelo dispositivo aqui proposto estão de acordo com o esperado para a usinagem do aço AISI 1045 e os parâmetros de corte utilizados. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho indicam que a metodologia utilizada para medição da força de corte com extensômetros elétricos e Arduino foi, em geral, satisfatória, principalmente considerando seu custo-benefício.

4. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos dos ensaios de torneamento cilíndrico externo realizados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- O aumento da profundidade de corte de 0,25 mm para 0,50 mm promoveu um aumento na força de corte de 83% para o avanço $f = 0,11$ mm/rot. Para o maior avanço ($f = 0,18$ mm/rot), o aumento foi de 76%.
- O aumento do avanço de 0,11 mm/rot para 0,18 mm/rot resultou em aumento da força de corte em 84% e 77% quando utilizadas as profundidades de corte de 0,25 mm e 0,50 mm, respectivamente.
- O dispositivo montado com extensômetros elétricos e Arduino conforme utilizado neste trabalho apresentou resultados, em geral, satisfatórios, principalmente considerando o custo total para sua montagem (R\$ 300,00). O dispositivo se mostrou sensível às diferentes condições de corte e apresentou medições de valores de força de corte, em geral, dentro do esperado para as condições utilizadas neste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Piauí pela liberação do Laboratório de Usinagem do Curso de Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Ciências e Engenharia Aeroespacial (LabCEA) – UFPI, onde foram realizados os ensaios e a montagem do dispositivo, respectivamente. Ana Katarina do Amaral Nunes agradece à FAPEPI via Edital 002/2021 projeto n. 6565.PGR272.60833.09042021, pelo apoio financeiro (bolsa de iniciação científica) que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bindu, B., Vinod, B.H., 2015. “Measurement of Cutting Forces in CNC Turning Centers: A Review”. *International Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 5, pp. 77-87.
- Brandão, G. L., Silva, P. M. C., Santos, C. L., Brandão, L. C., 2019. “Influence of Cutting Parameters on the Roughness of AISI 4340 Steel In The Turning Process”. In *10º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação*. ABCM, São Paulo, Brasil.
- Carvalho, F. K., 2020, “Influência dos parâmetros de corte na furação de chapas de alumínio 7075-T6”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber Editora Ltda., São Paulo, 9ª edição.
- Dos Santos, T. G., Cauduro, C. R., Fernandes, A. S., Ciliato, L. C., 2018. “MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE TORNEAMENTO ATRAVÉS DA MEDIDA DAS TENSÕES CISALHANTES”, *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, v.10 (2018). <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2018.v10.p.98-109>
- Groover, M. P., 2014, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Ed. Wiley-Blackwell, Rio de Janeiro, 5ª edição.
- Kuntoğlu, M., Sağlam, H., 2019. Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 140, 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.022>
- Liang Q., Zhang, D., Wu, W., Zou, K., 2016. “Methods and Research for Multi-Component Cutting Force Sensing Devices and Approaches in Machining. *Sensors*, 2016, 16, 1926. doi:10.3390/s16111926
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Ed. Blücher, São Paulo, 2ª edição.
- Santos, T. G., Cauduro, C. R., Fernandes, A. S., Ciliato, L. C., 2018. “Measure of Machining Forces in the Turning Process through Measurement of the Shear Stress”. *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, Vol.10, pp. 98-109.
- Silva, A. S., Paz, F. B., Rodrigues, L. H., Rosa, R. A., Projeto e construção de um dispositivo para medição de força de corte em processo de torneamento cilíndrico. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, 2014.
- Silva, F. V. P., 2014, “Forças de corte geradas por torneamento: um estudo de caso das ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-NbNi passíveis do efeito memória de forma”. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Silva, M. C., Vieira, T. C., *Estudo de um dispositivo didático de baixo custo para a medição de força de corte*, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- Subasi, O., Yazgi, S. G., Lazoglu, I., 2018. “A novel triaxial optoelectronic based dynamometer for machining processes. *Sensors and Actuators A* 279, 2018, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.019>

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MEASUREMENT OF CUTTING FORCES IN TURNING PROCESS WITH THE AID OF STRAIN GAUGES AND ARDUINO MICROCONTROLLER

Ana Katarina do Amaral Nunes, anakatarina@ufpi.edu.br¹

Viniciu Heros de Andrade Moreira, v.heros.andrade@gmail.com¹

Patrick Abreu de Oliveira, patrick.abreu@live.com¹

Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Ininga, CEP 64049-550, Teresina – PI.

Abstract. Material removal processes are widely used in the metalworking industry, since they guarantee versatility and flexibility component's production in general, allowing the manufacture of parts with a large variety of geometry and finishing. In such operations, knowledge of the behavior and order of magnitude of the cutting forces is of fundamental importance, since the control of these variables can guarantee that the process is carried out in order to obtain the best performance, and also provides information that helps the machine tools design and the selection of other parameters such as cutting power. Among the methodologies for this analysis, the use of strain gauges stands out for being an easily applicable option, with good measurement accuracy and low cost. In this sense, this work aims to measure the cutting force in the turning process with the aid of strain gauges and Arduino microcontroller, as well as to analyze the influence of feed rate and cutting depth on this output variable. For this, external cylindrical turning tests of AISI 1045 steel were carried out with a high-speed steel (HSS) cutting tool. Two levels of feed and two levels of depth of cut were tested. To carry out the tests, the transducer elements were mounted on the HSS bit in the complete Wheatstone bridge configuration, whose electrical resistance variation signal was amplified with the help of the HX711 module. The system data acquisition was performed through the Arduino Uno microcontroller and the PLX-DAQ software. The results showed that the methodology applied is satisfactory, given that the behavior of the signal acquired from the strain gauges was as expected, that is, an increase in cutting forces with feed rate and depth of cut.

Keywords: Cutting force, Strain Gauges, Arduino, Feed, Depth of cut.