

Sistema de aquisição de temperatura de baixo custo em processos usinagem utilizando a plataforma Arduino e termopar tipo K

Guilherme Siltori Acosta, gui.itusp@gmail.com¹
Amauri Hassui, ahassui@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica - Unicamp, Rua Mendeleev, 200 - Barão Geraldo - Campinas/SP.

Resumo. *O presente estudo visa mostrar a viabilidade da plataforma Arduino para a aquisição de temperatura da pastilha durante estudos em processos de usinagem, com foco operações de torneamento através da construção de um datalogger com sensor termopar tipo K, sendo esta uma plataforma de baixo custo, confiável, de fácil operação e manutenção, tendo se mostrado um sistema sensível a variação da temperatura durante o processo de torneamento, registrando corretamente os dados obtidos durante os testes.*

Palavras chave: *Arduino. Usinagem. Torneamento. Temperatura. Baixo custo*

Abstract. *This study aims to show the viability of the Arduino platform for the acquisition of insert temperature during studies in machining processes, focusing on turning operations through the construction of a datalogger with type K thermocouple sensor, which is a low-cost, reliable, easy to operate and maintain platform, showing to be a sensitive system to temperature variation during the turning process, registering correctly the data obtained during the tests.*

Keywords: *Arduino. Machining. Turning. Temperature. Low-cost*

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de corte onde o material é removido em forma de cavaco e a indústria demanda cada vez mais peças usinadas com alta qualidade e menor preço (Liew *et al.*, 2017).

Durante o processo de usinagem, muito calor é gerado pela deformação plástica do cavaco no plano de cisalhamento e pelo atrito nas interfaces ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, onde o aumento da temperatura gera influências na qualidade final da peça e no desgaste da ferramenta. O estudo da temperatura nas ferramentas de usinagem podem propor meios para reduzir o desgaste da ferramenta e como consequência reduzir o custo do processo produtivo, aumentando o tempo entre trocas de ferramenta e aumentando o número de peças a serem produzidas por uma ferramenta.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo de estudar a viabilidade da plataforma Arduino junto a um termopar tipo K para a realizar a leitura da temperatura na ferramenta durante o processo de torneamento, sendo este um conjunto de baixo custo e encontrado facilmente no varejo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Torneamento

O torneamento é um processo de usinagem onde a peça gira em torno de seu eixo e a ferramenta se desloca com avanço longitudinal ou transversal para realizar o corte do material (Machado *et al.*, 2009).

Machado *et al.* (2009) divide o torneamento em 8 divisões: torneamento cilíndrico externo, torneamento cilíndrico interno, torneamento cônico externo, torneamento cônico interno, faceamento, perfilamento, sangramento e recartilhamento. Neste trabalho os testes foram realizados usando o torneamento cilíndrico externo mostrado na Fig. 1.

2.2 Formação do cavaco

Segundo Diniz *et al.* (2014) em condições normais de usinagem com ferramentas de aço rápido ou de metal duro, a formação do cavaco ocorre da seguinte maneira:

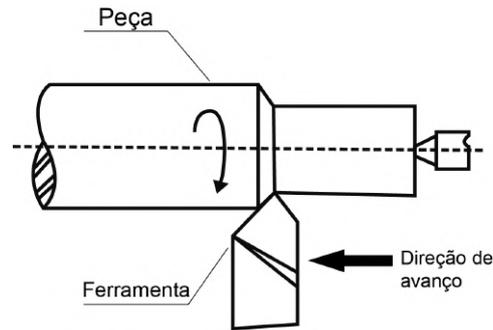


Figura 1. Torneamento externo (Feraresi, 1977)(Adaptado)

- Uma pequena porção do material é recalçada, ocorrendo a deformação elástica e plástica contra a superfície de saída da ferramenta.
- Esta deformação plástica aumenta progressivamente até atingir a tensão de cisalhamento, iniciando um deslizamento entre a porção de material recalçada e a peça.
- Com a penetração da ferramenta, haverá o cisalhamento parcial ou completa do cavaco.
- Devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno até o termino do processo de torneamento.

As condições nas quais o escorregamento da porção do material acontece têm influências marcantes em todo o processo, principalmente no mecanismo de formação do cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte e como consequência na temperatura de corte e taxa de desgaste das ferramentas, afetando assim o tempo de vida da ferramenta (Machado *et al.*, 2009).

2.3 Temperatura de corte

As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são as deformações e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça. As porcentagens do calor total devido a cada uma das fontes acima variam com o tipo de usinagem, o material da peça e da ferramenta, as condições de usinagem e a forma da ferramenta. Porém, numa primeira aproximação, pode-se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito peça com a superfície de folga da ferramenta (Diniz *et al.*, 2014).

A temperatura na zona de corte depende do contato entre ferramenta e cavaco, da magnitude da força de corte e das condições de atrito entre material e ferramenta, onde calor excessivo aumenta a temperatura na ferramenta, que amolece e acelera o desgaste e a sua quebra (Saglam *et al.*, 2007). O calor que vai para a peça pode resultar na dilatação térmica da peça, onde pode gerar danos na estrutura superficial do material e dificuldade na obtenção de pequenas tolerâncias dimensionais (Diniz *et al.*, 2014).

Todo esse calor é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e pelo fluido de corte, onde o percentual do calor dissipado por cada meio varia de acordo com os parâmetros de usinagem, podendo ser visto na Fig. 2, que apresenta a variação destas proporções em função da velocidade de corte da operação (Diniz *et al.*, 2014).

A quantidade de calor que é gerado na superfície de saída da ferramenta é pequena, porém como a região da ferramenta que recebe este calor (região de contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, como acontece na peça, são alcançadas altas temperaturas, podendo chegar aos 1200°C (Diniz *et al.*, 2014; Kus *et al.*, 2015), conforme observado na Fig. 3.

2.3.1 Medições de temperatura na usinagem

Santos and Sales (2007) citam vários métodos de medição de temperatura diante os processos de usinagem, desde modelos físicos e modelos matemáticos e computacionais, podendo ser resumido em: método calorimétrico, técnicas metalográficas, método termopar ferramenta/peça, termopar inserido na ferramenta, e medição por radiação infravermelha.

Neste trabalho será utilizado o método termopar ferramenta, sendo o termopar um sensor de contato termoeletrico formado pela junção de dois metais condutores, onde ocorre uma diferença de potencial em resposta a variação de temperatura, resumidamente, transformando a energia térmica em energia elétrica (Fraden, 2010). Existem no mercado diversos tipos de termopares, porem neste trabalho será focado no tipo K.

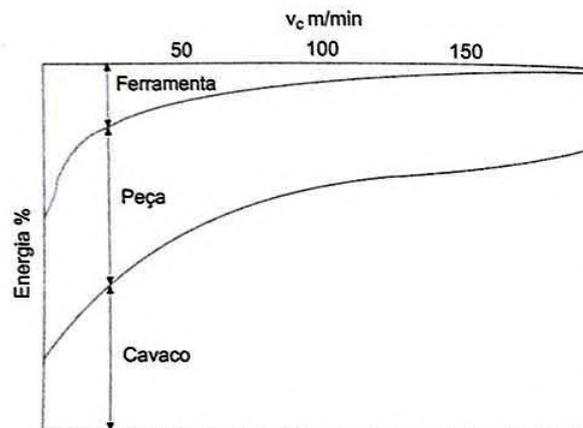


Figura 2. Variação da distribuição da energia de corte com a velocidade (Diniz *et al.*, 2014)

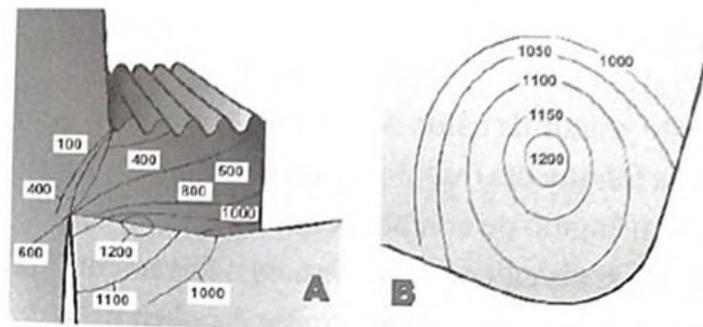


Figura 3. Distribuição típica de temperatura na ponta de uma ferramenta de metal duro (Diniz *et al.*, 2014)

De acordo com Fraden (2010) o termopar tipo k, formado por níquel e alumínio, é recomendado para o uso em temperaturas entre -200°C até 1260°C , sendo recomendado para a aquisição e monitoramento de temperaturas acima dos 540°C dado a sua resistência a oxidação.

2.4 Arduino

O Arduino, Figura 4, é uma placa de hardware livre, construída para promover a interação física entre o ambiente e o computador utilizando dispositivos eletrônicos de forma simples (Cavalcante *et al.*, 2011). Por se tratar de um *hardware* livre, o Arduino permite que hobbistas, inventores, pesquisadores, professores e estudantes possam desenvolver livremente seus projetos (Mourão, 2018).

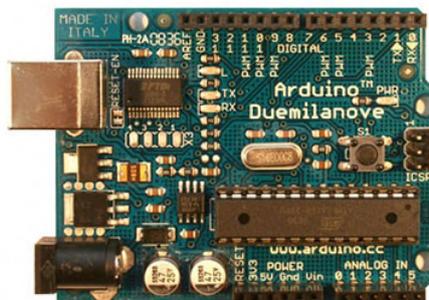


Figura 4. Arduino Duemilanove (Arduino.cc, 2020)

Segundo McRoberts (2011), uma das maiores vantagens do Arduino sobre outras plataformas de desenvolvimento é a sua facilidade de utilização, pois pessoas que não são da área técnica podem aprender rapidamente o básico e começar a montar seus projetos em um curto período de tempo.

O principal componente da placa Arduino é o microcontrolador Atmel ATmega 328, um dispositivo da família AVR

com arquitetura RISC, de 8 bits, e possui 28 pinos, dos quais 20 pinos podem ser utilizados como entrada e saída, sendo 14 pinos digitais e 6 pinos analógicos (Arduino.cc, 2020).

Toda programação é feita através da IDE Arduino, um software livre que utiliza uma linguagem de programação similar a C/C++ para fazer toda a programação necessária. Através da IDE se escreve o programa e faz o upload para para o Arduino através de um cabo USB conectado ao computador, que também fornece energia para o funcionamento da placa. Em projetos onde o Arduino não ficará conectado a um computador, é necessário uma fonte de alimentação de energia externa (Baeza, 2009).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Máquinas e equipamentos

3.1.1 Torno CNC

Foi utilizado um torno CNC Hardinge GS150, mostrado na Fig. 5, com potência de 20KW, com o controlador CNC Siemens 828D.



Figura 5. Torno CNC Hardinge GS 150 (Acervo dos autores)

3.1.2 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição dos dados, foi construído um *datalogger* simples e com baixo custo utilizando a plataforma Arduino junto a módulos compatíveis. Para sua construção foi utilizado 1 Arduino Duemilanove, junto a um módulo de gravação de dados Micro Card adapter V.1.0, mostrado na Fig. 6, que faz a gravação dos dados obtidos em um cartão micro sd.

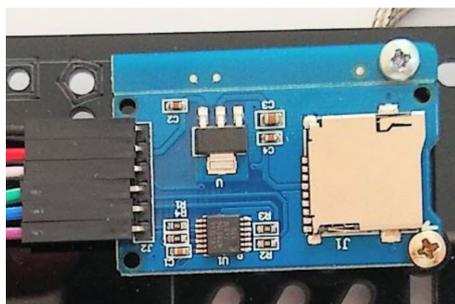


Figura 6. Micro Card adapter V.1.0 (Acervo dos autores)

Para a aquisição da temperatura na ferramenta, utilizou-se um sensor termopar tipo k, com faixa de trabalho de 0°C até 1100°C, este termopar possui uma rosca M5, realizando as medições com resolução de 0,250°C. Para a leitura da temperatura do sensor, utilizou-se o módulo MAX6675, que realiza a leitura do sensor termopar e o encaminha para o arduino. Esse módulo possui circuito de junta fria para o correto uso do termopar. O módulo e o sensor termopar são mostrados na Fig. 7.

3.1.3 Porta ferramenta

O porta ferramenta utilizado foi o Sandvik PDJNL 2020k 15, de sentido de corte L (esquerdo), com suas características mostrada na Tab. 1.

Para se acoplar o sensor termopar ao porta ferramenta, foi necessário realizar um desbaste na parte inferior do porta

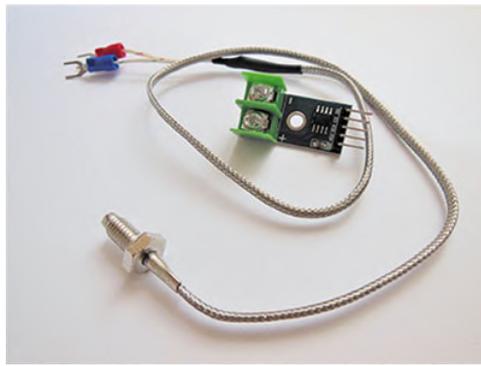


Figura 7. Módulo MAX6675 e termopar tipo K (Acervo dos autores)

Tabela 1. Características do porta ferramenta PDJNL 2020k 15

Ângulo da aresta de corte da ferramenta	93°
Ângulo de inclinação	-7°
Largura da haste	20 mm
Altura da haste	20 mm
Comprimento funcional	125 mm
Largura funcional	25 mm
Altura funcional	20 mm
Ângulo de ataque da ferramenta	-3°

ferramenta, logo abaixo da pastilha, esse procedimento foi realizado em um esmeril, o calço da pastilha também teve que ser desbastado para a correta instalação do sensor. Como o sensor possui uma rosca M5, foi soldada uma porca com diâmetro M5 no local desbastado, conforme mostrado na Fig. 8, ficando o sensor encostado na parte inferior da pastilha e sua aresta de corte.

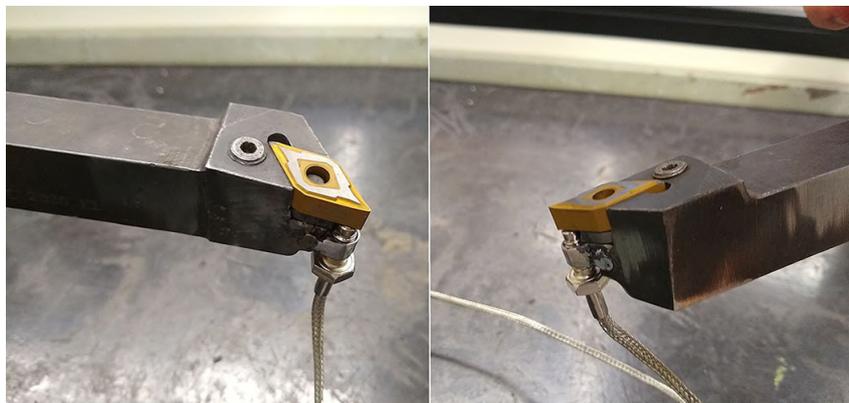


Figura 8. Adaptação realizada no porta ferramenta (Acervo dos autores)

3.1.4 Pastilha

A pastilha utilizada foi a Sandvik T-Max P DNMG 15 06 04-PM 4325, mostrada na Fig. 9, uma pastilha do tipo P, com suas características mostradas na Tab. 2.

3.1.5 Corpo de prova

Foi utilizado como corpo de prova uma barra de aço laminado ABNT 1045, com 2 polegadas de diâmetro, e 430 mm de comprimento. Primeiramente essa barra foi cortada em duas peças de 215 mm cada, e então esses corpos de prova foram usinados em torno convencional com o intuito de retirar a casca dura do material, deixando com um diâmetro final de 49 mm, e depois foi feito dois canais de 6 mm de largura por 5 mm de profundidade a fim de deixar cada barra de 215 mm com 2 corpos de prova, deixando cada corpo de prova com 80 mm para ser usinado durante o teste. Os corpos de prova são idênticos e a Fig. 10 tem seu desenho em 2D com suas respectivas cotas e sua visualização em 3D.



Figura 9. Pastilha T-Max P DNMG 15 06 04-PM 4325 (Acervo dos autores)

Tabela 2. Características da pastilha T-Max P DNMG 15 06 04-PM 4325

Comprimento efetivo da aresta de corte	15,104 mm
Número de arestas de corte	4
Raio de canto	0,3969 mm
Espessura da pastilha	6,35 mm
Classe	4325
Velocidade de corte(V_c)	355 a 470 m/min
Avanço(f)	0,1 a 0,3 mm/r
Profundidade de corte(A_p)	0,4 a 6 mm

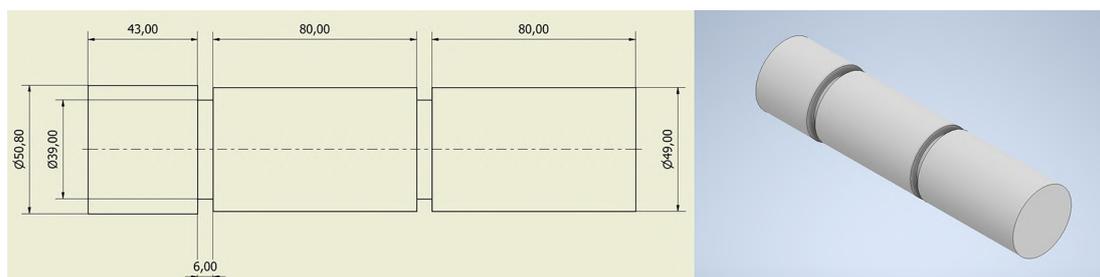


Figura 10. Desenhos 2D e 3D do corpo de prova (Acervo dos autores)

3.2 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte possuem influência na temperatura da pastilha durante todo o processo de usinagem. Para esse trabalho foi utilizado os parâmetros de corte adequados para o desbaste do material a ser usinado e dentro dos parâmetros da pastilha escolhida para esse experimento. Os parâmetros de corte utilizados nos 3 ensaios realizados nesse experimento são demonstrados na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros de corte utilizados

Ensaio 1	
Velocidade de corte(v_c)	360 m/min
Avanço(f)	0,2 mm/r
Profundidade de corte(a_p)	1 mm
Ensaio 2	
Velocidade de corte(v_c)	380 m/min
Avanço(f)	0,2 mm/r
Profundidade de corte(a_p)	1 mm
Ensaio 3	
Velocidade de corte(v_c)	400 m/min
Avanço(f)	0,2 mm/r
Profundidade de corte(a_p)	1 mm

Nos 3 ensaios optou-se em manter a profundidade de corte e o avanço iguais, variando apenas a velocidade de corte, sendo essa a maior responsável pelo desgaste da pastilha, e por isso foi esse o parâmetro escolhido para ser variado no experimento. A velocidade de corte (v_c) foi escolhida entre a faixa de operação da pastilha, conforme mostrada na tabela 3, sendo de 360 m/min o mais próximo do limite mínimo, e por razão da ferramenta ter sido desbastada para a colocação do sensor, foi decidido não ultrapassar a velocidade de corte de 400 m/min com o intuito de não ocorrer a quebra da ferramenta, e sendo assim escolhe-se a velocidade de corte de 380 m/min como a velocidade intermediária desse ensaio. O avanço (f) escolhido foi de 0,2 mm/r, um valor intermediário entre os valores adequados de uso da pastilha. Para a profundidade de corte (a_p), chegou-se ao valor de 1 mm através de testes com um corpo de prova, onde na primeira passada com 0,4 mm (menor a_p recomendado da pastilha), e na segunda passada, com 0,7 mm o cavaco formado foi da forma de fita em ambos, sendo que apenas na terceira passada com 1 mm que se obteve o cavaco de forma em lascas, sendo optado por esse tipo de cavaco para a segurança do experimento, já que o cavaco em fita poderia se enroscar no fio do sensor e rompe-lo.

Tendo escolhido os parâmetros de corte, foi elaborado a estratégia de usinagem para os corpos de prova, sendo realizado 5 passadas com o a_p de 1 mm, no comprimento de 80 mm por corpo de prova, sendo retirado 10 mm de diâmetro por ensaio (diâmetro inicial de 49 mm e final de 39mm), e entre cada ensaio foi definido um intervalo de 15 minutos para que o sensor voltasse a temperatura ambiente.

3.3 Datalogger

Para a montagem do datalogger, o sistema que irá registrar os dados da temperatura da pastilha, foram utilizados os equipamentos descritos anteriormente, e como se trata de um micro controlador Arduino e módulos específicos para dada tarefa, tem-se o modo correto de montagem para seu correto funcionamento, mostrado seu esquema eletrônico na Fig. 11. Para fornecer a energia necessária para o funcionamento do datalogger foi utilizada uma bateria de 10500 mAh.

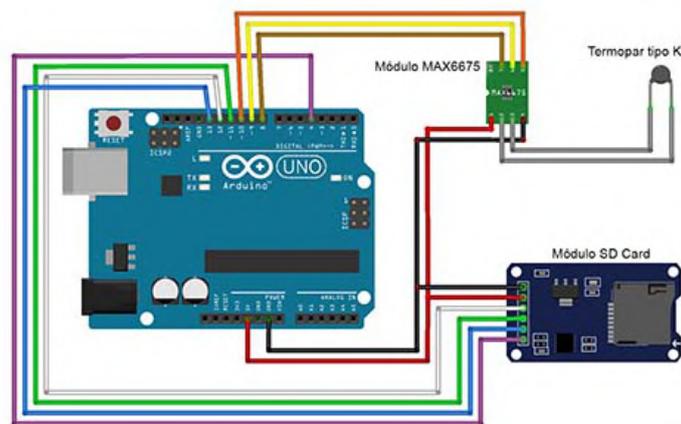


Figura 11. Esquema eletrônico do Datalogger (Acervo dos autores)

O funcionamento do datalogger consiste da seguinte forma: o módulo MAX 6675 recebe a diferença de potencial do termopar tipo K, e o converte para a temperatura em graus Celsius e o envia para o arduino, o arduino recebe a leitura da temperatura do módulo MAX6675, e junto ao tempo do ensaio, controlado pelo próprio arduino, o envia para o módulo SD Card para a gravação dos dados, e o módulo SD Card abre o arquivo de texto, insere o tempo e a temperatura enviada pelo arduino no arquivo, e então fecha o arquivo de texto localizado no cartão micro SD, e o ciclo se reinicia.

O datalogger foi instalado sobre a torre de ferramentas do torno CNC, a uma distância segura da ferramenta e da peça, para não ocorrer riscos de cavacos atingirem as partes eletrônicas do datalogger e comprometer seu funcionamento. A Fig. 12 o mostra instalado na torre de ferramentas do torno CNC.

Após cada teste, o datalogger é desligado, o cartão micro SD onde os dados são gravados é retirado, e seus dados são exportados para o Microsoft Excel, onde esses dados são tratados. Após a coleta dos dados, o cartão é formatado e inserido novamente no datalogger para um novo teste.

4. RESULTADOS

4.1 Temperaturas obtidas durante os ensaios

Após coletado todos os dados dos ensaios, os mesmos foram importados no Excel para realizar seu tratamento, e logo após foi exportado para o software SciDavis para a geração dos gráficos com a temperatura e o tempo do processo. A Fig. 13 mostra as temperaturas obtidas na face oposta a aresta de corte da pastilha, estando o sensor distante 6,35 mm da

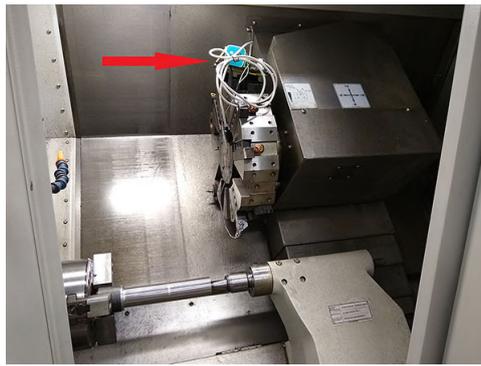


Figura 12. Datalogger instalado no torno CNC (Acervo dos autores)

aresta de corte.

Em uma primeira análise do gráfico, pode-se observar que não houve nenhuma falha durante a aquisição dos valores de temperatura, onde em nenhum momento dos 3 testes o valor da temperatura esteve ausente em determinado segundo, mostrando que o sistema é confiável.

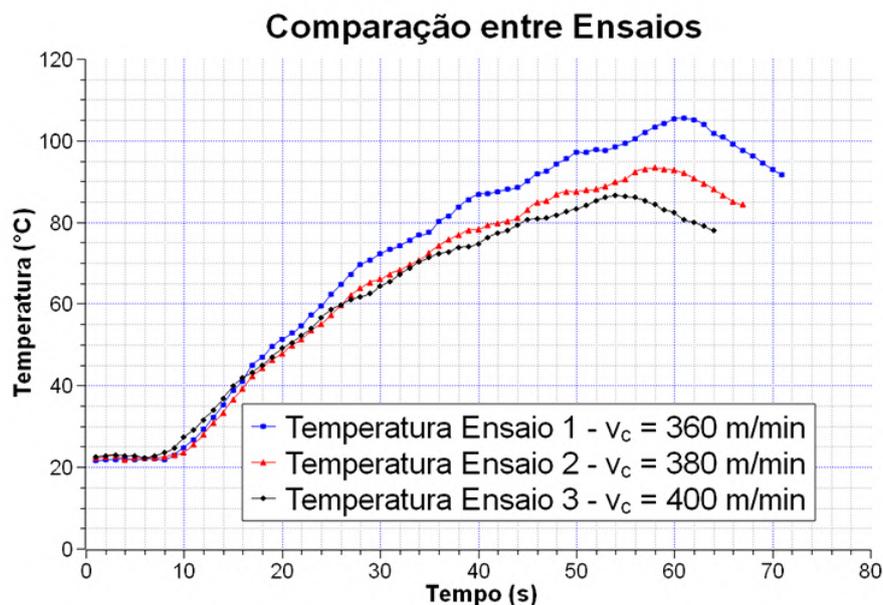


Figura 13. Gráficos da temperatura obtida nos 3 ensaios (Acervo dos autores)

Após analisar o gráfico, pode-se observar que houve uma diminuição de temperatura considerável em cada ensaio conforme a velocidade de corte aumentava. A temperatura máxima registrada foi de 105,50 °C no ensaio 1, 93,25 °C no ensaio 2 e 86,50 °C no ensaio 3. Essa queda na temperatura observada entre os ensaios em relação ao aumento da velocidade de corte se deve ao fato em que conforme se aumentou a velocidade de corte, menor foi o tempo de contato da ferramenta com a peça, tendo em situação que os corpos de prova utilizados nesse trabalho eram pequenos. Nos 3 ensaios foi observado que não se chegou na temperatura máxima de corte, onde não se observou a estabilização da temperatura de corte, sendo visível uma queda de temperatura logo após o registro da temperatura máxima, referente ao afastamento da ferramenta ao fim do processo.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesse trabalho pode-se concluir que a plataforma Arduino junto ao módulo MAX6685 e ao termopar tipo K, que são produtos encontrados facilmente em sites de comércio de componentes eletrônicos, são confiáveis e viáveis, pois apresentam um custo acessível de aquisição, sendo de fácil montagem, possuindo uma curva de aprendizado considerada fácil e com muita informação disponível tanto em livros quanto em sites especializados, sendo então uma ótima plataforma de aquisição de dados para experimentos envolvendo aquisição e análise de temperatura em processos de usinagem, sendo ela mais simples e com menor custo de operação em relação a outros métodos de aquisição de temperatura utilizados na usinagem.

Devido as dimensões do corpo de prova utilizado neste experimento não foi possível chegar na temperatura máxima do processo, visto que a temperatura não se estabilizou, porem o sistema se mostrou sensível a variação de temperatura durante os 3 testes, registrando com precisão e sem falhas as temperaturas obtidas durante todo o tempo de usinagem, mostrando-se um sistema confiável para estudos de temperatura na pastilha durante o processo de torneamento.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Faculdade de Tecnologia de Sorocaba “ José Crespo Gonzales” por ceder o laboratório de usinagem CNC para a realização deste trabalho, ao colega de mestrado Marcio da Silva Macedo pela usinagem dos corpos de prova utilizados neste trabalho e ajuda na adaptação do porta ferramenta, aos coordenadores de curso Ms. Samuel Mendes Franco e Ms. Amilton Joaquim Cordeiro pelo intermédio para a liberação do laboratório de usinagem, e ao auxiliar de docente José Josimar de Oliveira pela ajuda e operação com o torno CNC durante os ensaios.

7. REFERÊNCIAS

- Arduino.cc, 2020. “Arduino Duemilanove”. URL <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>.
- Baeza, J.P., 2009. “Manual de arduino”. *Grupo de Innovación Educativa en Automática. Universidad de Alcalá. España*, Vol. 1, p. 2.
- Cavalcante, M.A., Tavoraro, C.R.C. and Molisani, E., 2011. “Física com Arduino para iniciantes”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 33, No. 4. ISSN 01024744. doi:10.1590/S1806-11172011000400018.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. and Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber Editora, São Paulo, 9th edition. ISBN 8587296019.
- Ferraresi, D., 1977. *Fundamentos da usinagem dos metais*. Blucher, São Paulo. ISBN 9788521214199.
- Fraden, J., 2010. *Handbook of Modern Sensors*. Springer New York, New York, NY, 4th edition. ISBN 978-1-4419-6465-6. doi:10.1007/978-1-4419-6466-3. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6466-3>.
- Kus, A., Isik, Y., Cakir, M., Coşkun, S. and Özdemir, K., 2015. “Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting”. *Sensors*, Vol. 15, No. 1, pp. 1274–1291. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s150101274. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/1/1274>.
- Liew, P.J., Shaaroni, A., Sidik, N.A.C. and Yan, J., 2017. “An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel”. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077>.
- Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. and Silva, M.B., 2009. *Teoria da usinagem dos materiais*. Blucher, São Paulo, 1st edition. ISBN 9788521204527.
- McRoberts, M., 2011. *Arduino Básico*. Novatec, São Paulo, 1st edition. ISBN 978-85-7522-274-4.
- Mourão, O., 2018. *Arduino & Ensino de Física - Automação de práticas experimentais*. Clube dos Autores, Tianguá, 1st edition. URL http://www1.fisica.org.br/mnpef/sites/default/files/produto_oseias.pdf.
- Saglam, H., Yaldiz, S. and Unsacar, F., 2007. “The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature”. *Materials & Design*, Vol. 28, No. 1, pp. 101–111. ISSN 02613069. doi:10.1016/j.matdes.2005.05.015. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306905001536>.
- Santos, S.C. and Sales, W.F., 2007. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*, Vol. 246.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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