

ANÁLISE DAS FORÇAS ELETROMOTRIZES PRODUZIDAS DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM ATRAVÉS DO MÉTODO DO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA EM FERRAMENTAS COM CANAIS DE REFRIGERAÇÃO INTERNO

Pedro Henrique Pires França

Lucas Melo Queiroz Barbosa

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 10, Uberlândia/MG.

pedrohenriquepiresf96@gmail.com; lmqbarbosa@gmail.com

Gustavo Henrique Nazareno Fernandes

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 10, Uberlândia/MG.

ghnfernandes@gmail.com

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – BH145, Rua Aimores, Belo Horizonte/MG.

Paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 10, Uberlândia/MG.

mbacci@ufu.br

Resumo. Devido ao aumento da preocupação ambiental, cada vez mais os governos impõem leis mais rígidas a fim de sua preservação. Com isso, as indústrias são obrigadas a trabalharem com técnicas de fabricação mais sustentáveis. Na usinagem, sabe-se que a maioria das técnicas que auxiliam no aumento da vida da ferramenta normalmente agredem o meio ambiente, como principal método pode-se citar a aplicação dos fluidos de corte. Embora os fluidos de corte se mostrem eficazes, eles contribuem fortemente no impacto ambiental, tornando a sua utilização questionada. Há muitos anos, várias pesquisas vêm sendo realizadas para diminuir/extinguir o uso desses fluidos, como a aplicação de revestimentos em ferramentas de corte, usinagem a seco ou aplicação de métodos de refrigeração alternativos. Neste trabalho, é apresentado o estudo térmico de uma nova técnica de refrigeração de ferramentas, que tem como objetivo substituir o uso desses fluidos. O foco deste estudo foi verificar a sua eficácia através da medição das forças eletromotrizes geradas durante a usinagem pelo método do termopar ferramenta-peça. A partir das medições verificou-se um pequeno aumento nas forças eletromotrizes com a utilização desta nova técnica comparando a usinagem a seco, assim como uma redução de temperatura significativa em outras regiões da ferramenta. A força eletromotriz pode ser utilizada para estimar a temperatura na interface cavaco ferramenta após adequada calibração do sistema.

Palavras chaves: refrigeração, temperatura, fluidos de corte, termopar ferramenta-peça, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, cada vez mais as empresas visam fabricar produtos com baixo custo, alta produtividade, e bom acabamento. Para se atingir uma alta produtividade, é necessário trabalhar com altas velocidades de corte, penetração de trabalho e taxas de avanço (Machado et al., 2009). Entretanto, o aumento desses parâmetros gera uma elevação do calor gerado na zona de corte, podendo induzir a problemas geométricos, diminuição da resistência mecânica da peça e vida da ferramenta. Por isso, uma das formas para controlar esses problemas devido as altas gerações de calor, é a utilização dos fluidos de corte, que tem como um dos papéis refrigerar a zona de corte.

Entretanto, embora os fluidos de corte sejam eficazes na refrigeração da zona de corte, há alguns pontos negativos que justificam o motivo de vários pesquisadores buscarem novas formas de melhorar a eficiência da usinagem com pouca ou nenhuma utilização de fluido. A aplicação dos fluidos de corte em grande parte, pode criar severos impactos ambientais, como a poluição ou contaminação da água, do solo, e do ar, além de causar sérios problemas para a saúde dos

operadores (Lisboa et al., 2009). Shashidhara & Jayaram (2010) relatam que cerca de 80 % das infecções que os operadores em usinagem adquirem é devido ao contato de fluidos de corte com a pele. O motivo disso é devido à complexidade em sua composição, o que pode conter substâncias alérgicas ou irritantes.

Em vista desses fatos, este trabalho apresenta um estudo relacionado às temperaturas de usinagem através do método do termopar ferramenta-peça de uma nova tecnologia, que propõe substituir/minimizar a utilização dos fluidos de corte utilizando um sistema com ferramenta refrigerada internamente.

2. APARATO EXPERIMENTAL – TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

2.1 Sistema do termopar ferramenta-peça

O termopar ferramenta-peça é uma técnica de medição de temperatura experimental que segue o princípio das leis dos termopares, onde determina-se as temperaturas de usinagem através das forças eletromotrizes (f.e.m), que são geradas durante o processo de corte. Pela figura 1 é possível observar uma configuração simplificada deste sistema em que são feitas as medições de temperatura.

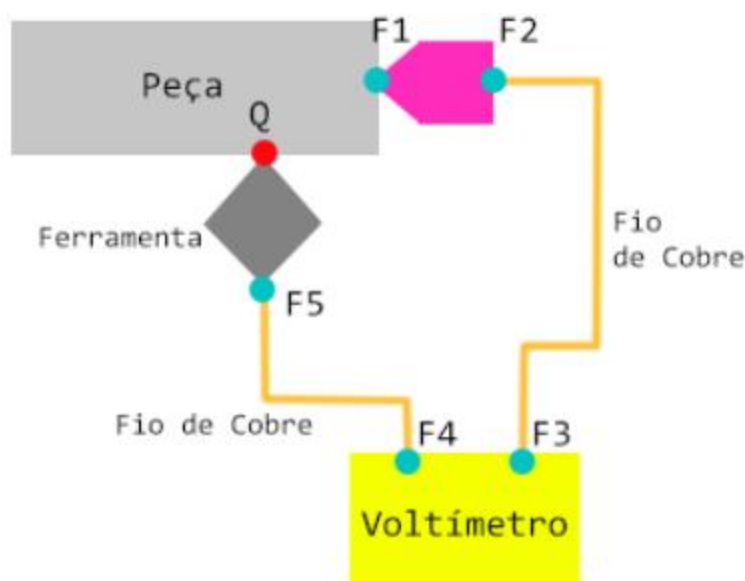


Figura 1. Esquema representativo do termopar ferramenta-peça.

O ponto de contato entre a ferramenta e a peça Q é denominado de junta quente (em vermelho), que representa a temperatura gerada durante a operação de usinagem. Já os contatos F1, F2, F3, F4 e F5 representam as juntas frias (em azul). Nesta configuração utiliza-se um contra pontas rotativo, onde o sinal elétrico é transferido através de uma cuba de mercúrio localizado internamente a esse componente (Kaminise, 2012). Com a conexão dos fios elétricos que saem das juntas F5 (conexão da ferramenta a um fio elétrico) e F2 (conexão do fio elétrico ao mercúrio do contra pontas) em F3 e F4 é possível obter o sinal elétrico do sistema e assim determinar as temperaturas de usinagem (Machado et. al, 2009).

Ao descrever o sistema do termopar ferramenta-peça como um sistema elétrico (Figura 3), considerando todas as junções, obtém-se a f.e.m geral do sistema (ΔE) descrito na equação (1):

$$\Delta E = E_{fp} T1 + E_{bf} T2 + E_{pa} T3 + E_{ab} T4 \quad (1)$$

Sendo E_{fp} a f.e.m gerada na junta quente T1, E_{bf} a f.e.m gerada entre o fio de cobre e a ferramenta, E_{pa} a f.e.m gerada da peça com o material A e E_{ab} é a f.e.m gerada entre o material A e o fio de cobre. Nota-se pela equação 1, que, embora o objetivo seja determinar T1, haverá no sistema diversas juntas frias que podem estar submetidas a diferentes temperaturas e f.e.ms, nas quais podem influenciar no sistema. A Figura 2 ilustra o sistema elétrico equivalente para o sistema simplificado apresentado.

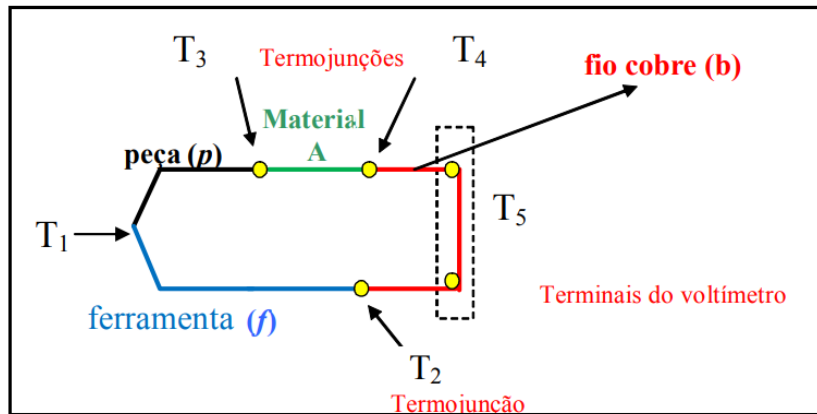


Figura 2. Reprodução esquemática do sistema elétrico do termopar ferramenta-peça (Kaminise,2012).

2.2 Sistema do termopar ferramenta-peça com compensação física

Análogo ao sistema do termopar ferramenta-peça, o termopar ferramenta-peça com compensação física é uma proposta utilizada no trabalho de Kaminise (2012). Segundo Kaminise (2012) a utilização desse componente tem como objetivo não só minimizar o efeito das f.e.m.s geradas pelas diversas juntas frias através da adição de dois materiais na cadeia que compõe o sistema original de medição, que são o material da peça A e material da peça P, mas também permitir a calibração no próprio aparato experimental, que por outro lado, na maioria das vezes é realizado externamente, podendo não representar adequadamente o sistema de forma mais realista. A figura 3 ilustra o circuito elétrico do termopar ferramenta-peça com o elemento de compensação física.

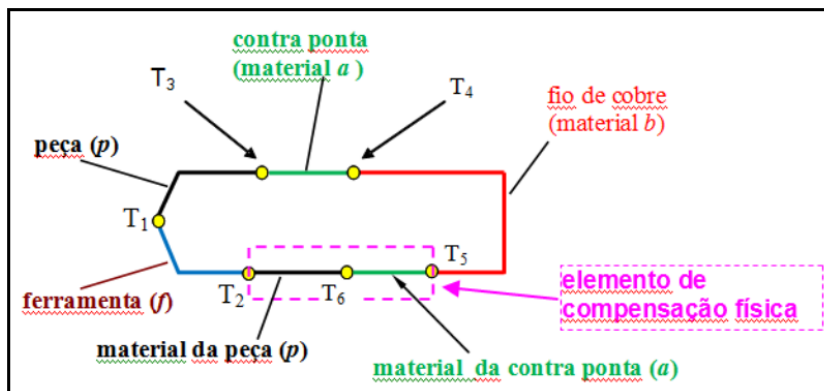


Figura 3. Representação esquemática do sistema termopar ferramenta-peça com a adição de um elemento de compensação físico (Kaminise,2012).

Realizando a análise do circuito elétrico, levando em conta todas as junções com suas respectivas f.e.ms , obtém-se a equação (2):

$$\Delta E = E_{fp} T1 + E_{pa} T3 + E_{ab} T4 - E_{ab} T5 - E_{pa} T6 - E_{fp} T2 \quad (2)$$

Ao considerar que as juntas frias distantes da zona de corte não sofrem influência térmica do processo, ou seja, estão submetidas a mesma temperatura, tem-se as relações $T3=T4=T5=T6$ e as seguintes igualdades:

$$E_{pa} T3 = E_{pa} T6 \text{ e } E_{ab} T4 = E_{ab} T5$$

A partir disso, simplificando a equação (2), obtém-se a equação (3):

$$\Delta E = E_{fp} T1 - E_{fp} T2 = K (T1 - T2) \quad (3)$$

Isolando T1, tem-se (4):

$$T1 = T2 + \frac{\Delta E}{K} \quad (4)$$

Nota-se que, pela equação (4) é possível obter as temperaturas de usinagem a partir da medição da f.e.m ΔE medida em um voltímetro, sendo T1 a temperatura obtida na interface cavaco-ferramenta, T2 a temperatura da junção entre a ferramenta e o elemento de compensação, e K a constante de Seebeck, que é obtida a partir da calibração do sistema.

É importante destacar que, as temperaturas obtidas em T2 podem variar ao longo do processo de corte, especialmente no caso da utilização de insertos (Stephenson e Agapiou, 2016). Por isso, é importante que T2 seja medida tanto na calibração quanto na realização dos ensaios e também levada em consideração durante a realização dos cálculos.

3. METODOLOGIA

Para realização da medição de temperatura dos ensaios de torneamento, foi utilizada uma barra de ferro fundido cinzento da classe FC-300 de acordo com a norma ABNT NBR 6916, apresentando um diâmetro de 76 mm. Todos os ensaios foram realizados em um torno mecânico universal mecânico IMOR MAX II. Foram realizados ensaios onde foram variadas a velocidade de corte e o tipo de resfriamento. Os parâmetros avanço e profundidade de corte foram mantidos constantes com valores de 0,095 mm/rev e 0,5 mm. Foram utilizados três níveis de velocidade de corte: 82 m/min, 132 m/min e 212 m/min. Foram investigados duas formas diferentes de refrigeração, a primeira foi a usinagem a seco, na qual foi utilizado uma ferramenta comum e sem modificações de modelo ISO SNUN120412, já no segundo foi utilizado como base uma ferramenta das mesmas especificações, mas com galerias internas a fim de permitir a passagem de um fluido. O fluido utilizado neste caso foi água refrigerada com uma temperatura média de 2 °C, conforme o esquema representado na figura 4.

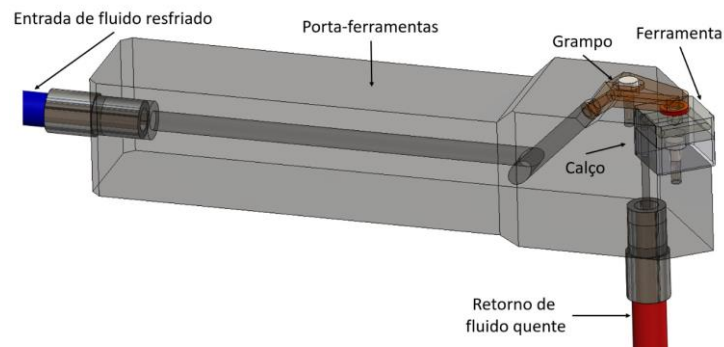


Figura 4. Esquema do sistema de refrigeração

Para cada percurso de usinagem foi designado um tempo de 40 s, necessário para atingir as temperaturas de usinagem em um regime considerado estacionário. Dessa forma foram realizados 6 ensaios, alterando os parâmetros, velocidade de corte e sistema de resfriamento, em apenas um passe na barra. A realização dos ensaios no mesmo diâmetro diminui o efeito da variação da microestrutura ao longo do diâmetro da barra.

Com relação ao posicionamento da junta de compensação, ela foi inserida em uma aresta lateral do inserto de metal duro utilizado durante os experimentos. Um termopar do tipo K foi fixado próximo a esta junta, medindo assim a temperatura T2, conforme ilustra a figura 6.

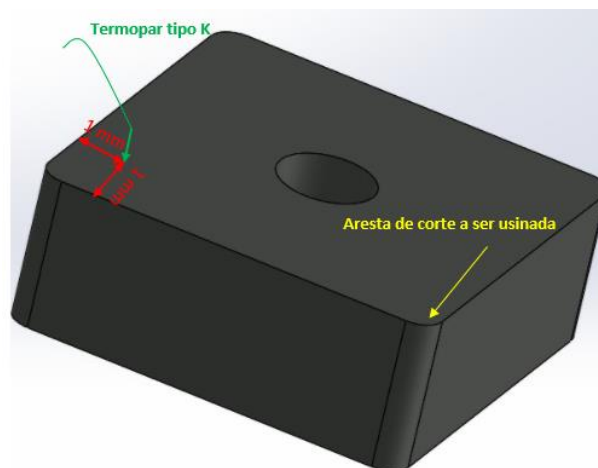


Figura 5. Posição do termopar do tipo K.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da tabela 1 é possível visualizar as f.e.m.s médias obtidas para os ensaios realizados com as ferramentas refrigeradas e a seco. Nota-se que, com o aumento da velocidade de corte a f.e.m gerada para ambas as condições de corte aumenta. Isto é esperado pois a força eletromotriz gerada é proporcional ao aumento de temperatura, que aumenta com a velocidade de corte. Tal fato pode ser comprovado através dos trabalhos de Kaminise (2012) e Junior (2020), que mediram a temperatura através do termopar ferramenta-peça e obtiveram um comportamento semelhante.

Tabela 1 - F.e.ms média obtidas durante os ensaios de usinagem para cada condição de ensaio.

Velocidade de corte (m/min)	F.e.m Refrigerado (mV)	F.e.m Seco (mV)
84,76	0,00517 ± 0,00085	0,00440 ± 0,00019
133,71	0,00627 ± 0,00079	0,00575 ± 0,00021
214,88	0,00696 ± 0,00014	0,00660 ± 0,00019

Ao analisar as f.e.m.s obtidas para uma mesma velocidade de corte em diferentes condições de refrigeração, nota-se que as tensões são maiores com a utilização do inserto refrigerado. No entanto, não se pode afirmar que isto significa um aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta. É necessário realizar a calibração do sistema, pois esta f.e.m é proporcional à diferença de temperatura entre a interface cavaco-ferramenta e temperatura na junta de compensação.

Pela figura 6 é possível observar o gráfico que mostra as diferenças de temperatura próximas da junta de compensação durante o processo de usinagem para as condições seco e refrigerado. Nota-se claramente que houve diferença entre utilizar um inserto refrigerado e um comum (a seco). A utilização de insertos refrigerados proporcionou temperaturas menores na junta de compensação, indicando que as ferramentas refrigeradas alteram o gradiente térmico gerado durante o corte. Também foi possível notar que, mesmo variando a velocidade de corte em três níveis diferentes, não houve uma alteração significativa de temperatura em T2, diferente da usinagem a seco que apresentou valores mais distantes.

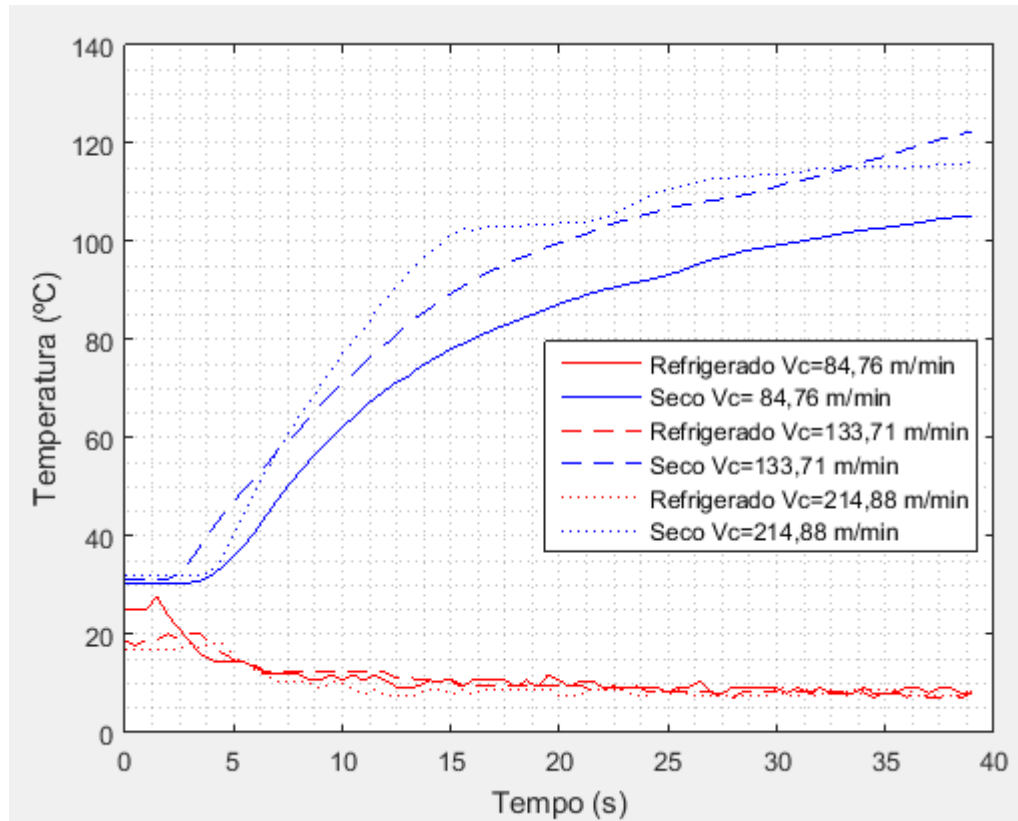


Figura 6. Temperaturas medidas próximas a junta de compensação.

5. CONCLUSÃO

Após as análises das forças eletromotrizes obtidas foi concluído que:

- Ao aumentar a velocidade de corte a força eletromotriz gerada também aumenta.
- A utilização de insertos refrigerados pode levar a um aumento na força eletromotriz obtida em comparação ao mesmo processo a partir da utilização de insertos comuns. No entanto, para determinar o efeito nas temperaturas da interface cavaco-ferramenta é necessário realizar o levantamento da curva de calibração do sistema.
- A utilização do novo sistema de refrigeração se mostrou eficaz na redução das temperaturas em zonas externas a interface cavaco ferramenta.

6. REFERÊNCIAS

- Junior, E. D. de L., 2020. “Medição da Temperatura de Corte no Torneamento do Aço-Ferramenta AISI D6 Temperado e Revenido Auxiliado por LN2. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Kaminise, A. K., 2012. “Estudo Da Influência Do Material Do Porta-Ferramenta Sobre Temperaturas De Usinagem No Torneamento”. Universidade Federal de Uberlândia.
- Lisboa F.C.; Moraes, J. J. B.; Hirashita, M.A., 2013. “Fluidos De Corte: Uma Abordagem Geral E Novas Tendências”. *XXXIII Encontro Nacional De Engenharia De Producao*. Salvador, Bahia, Brasil.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Da Silva, M.B., 2009. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.
- Shashidhara, Y. M. Â.; Jayaram, S. R., 2010. “Tribology International Vegetable oils as a potential cutting fluid — An evolution”. *Tribology International*, v. 43, n. 5–6, p. 1073–1081.
- Stephenson, D.A., Agapiou, J.S., 2006. “Metal Cutting Theory and Practice”, 2nd Edition, Taylor & Francis.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE ELECTROMOTIVE FORCES PRODUCED DURING THE MACHINING PROCESS THROUGH THE TOOL-WORK THERMOCOUPLE METHOD IN TOOLS WITH INTERNAL COOLING CHANNELS

Pedro Henrique Pires França

Lucas Melo Queiroz Barbosa

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.

pedrohenriquepiresf96@gmail.com; lmqbarbosa@gmail.com

Gustavo Henrique Nazareno Fernandes

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.

ghnfernandes@gmail.com

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – BH145, Rua Aimores, Belo Horizonte/MG.

Paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.

mbacci@ufu.br

Abstract. *Due to increasing environmental concerns, governments are increasingly imposing stricter laws in order to preserve them. As a result, industries are forced to work with more sustainable manufacturing techniques. In machining, it is known that most of the techniques that help to increase the life of the tool normally harm the environment, as the main method can be mentioned the application of cutting fluids. Although cutting fluids are effective, they strongly contribute to the environmental impact, making their use questioned. For many years, several researches have been carried out to decrease / extinguish the use of these fluids, such as the application of coatings on cutting tools, dry machining or the application of alternative cooling methods. In this work, the thermal study of a new tool cooling technique is presented, which aims to replace the use of these fluids. The focus of this study was to verify its effectiveness by measuring the electromotive forces generated during machining by the tool-work thermocouple method. From the measurements there was a small increase in electromotive forces with the use of this new technique comparing dry machining, as well as a significant temperature reduction in other regions of the tool. The electromotive force can be used to estimate the temperature at the tool chip interface after adequate system calibration.*

keywords: *refrigeration, temperature, cutting fluids, tool-work thermocouple, sustainability.*