

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DA LIGA TI-6AL-4V

Renato Nunes Cunha

Márcio Bacci da Silva

Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1O, Sala 2B, Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
renatonc@ufu.br, mbacci@ufu.br

Resumo. O estudo de processos de usinagem de materiais de difícil corte, como as ligas de titânio por exemplo, tem um papel importante na compreensão do desgaste acelerado que afeta a vida útil da ferramenta devido às altas temperaturas do processo. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo investigar a influência dos parâmetros de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta medida pelo método do termopar ferramenta-peça no torneamento cilíndrico externo da liga Ti-6Al-4V. Também foi desenvolvida uma metodologia para calibração do sistema, um dos grandes problemas para utilização do método. A ferramenta de corte utilizada foi o metal duro da classe K10 sem revestimento em forma de barra, devidamente afiada. Os resultados obtidos nos testes de calibração demonstraram um comportamento linear na relação entre temperatura e potencial elétrico ao longo da faixa de temperaturas usadas na calibração e obtidas nos ensaios experimentais. Além disso, a calibração ao utilizar a contra ponta modificada e o pino desenvolvido no presente trabalho, demonstraram resultados semelhantes. Nos testes de torneamento cilíndrico os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) e a condição de lubri-refrigeração (seco ou MQL) foram variadas e os resultados obtidos mostram que os parâmetros de corte influenciam diretamente na temperatura de usinagem.

Palavras chave: Torneamento. Titânio. Temperatura de usinagem. Método termopar ferramenta-peça.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Costa (2014), durante a usinagem de um metal, praticamente toda a energia consumida é convertida em calor. A maior parte dela é dissipada pelo cavaco, uma pequena parte pela peça e meio ambiente, e o restante é dissipado pela ferramenta. Esta partição de calor depende de vários fatores e ainda hoje é investigada (Costa, 2019).

De acordo com Machado *et al.* (2011), o calor transformado durante a execução de um determinado processo pode muitas vezes trazer danos ou benefícios para o processo de usinagem. Com isso surge a necessidade de se entender bem a quantidade de calor transformado durante a usinagem, para se ter um controle do comportamento do sistema ferramenta-peça. Para a produtividade na usinagem ser maior, a velocidade de corte deve ter seu valor aumentado. Porém, o fator temperatura limita o valor máximo da velocidade de corte, já que a temperatura tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte.

De acordo com Da Silva e Wallbank (1999), o aumento da potência para remover material em um menor tempo, aumenta o calor próximo à aresta cortante da ferramenta, e assim, praticamente toda a energia consumida na usinagem é convertida em calor. Sabe-se que a temperatura altera as propriedades mecânicas da ferramenta, como a dureza, o que limita a vida desta e, consequentemente, acarreta problemas econômicos. Além disso, a temperatura é diretamente proporcional à velocidade de corte, portanto, é a temperatura da interface cavaco-ferramenta que limita a velocidade de corte em um processo de usinagem. Assim, conhecer a temperatura de usinagem pode contribuir para que o processo seja realizado em ótimo rendimento.

Baseado nisso, com o intuito de monitorar a temperatura nas regiões próximas à ferramenta, foram desenvolvidos alguns métodos experimentais, como por exemplo o método do termopar ferramenta-peça, objeto de análise desta pesquisa. O termopar pode ser definido como um sistema formado por dois condutores metálicos distintos, sendo puros ou de ligas homogêneas. Esses fios condutores têm uma de suas extremidades soldadas na região denominada por “junta de medição” e as outras são conectadas ao instrumento de medição na região denominada por “junta de referência”, fechando o circuito elétrico. No método do termopar ferramenta-peça um dos condutores é a peça e o outro a ferramenta. A junta de medição é o contato da ferramenta com o cavaco/peça (Machado *et al.*, 2009).

Segundo Shaw (2005), as ligas de titânio são utilizadas devido as suas características como elevada resistência a fluência, elevada resistência mecânica para um peso relativo menor do que em relação aos aços e excelente resistência à corrosão. Porém como desvantagem ela apresenta baixa condutividade térmica, alta reatividade química, baixo módulo de elasticidade, alta dureza e resistência a temperaturas elevadas e características peculiares de encruamento. Essas características, principalmente a baixa condutividade térmica, fazem com que a usinagem das ligas de titânio gere elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, que é um dos motivos deste material ser de difícil usinagem.

Apesar da eficiência do método do termopar ferramenta-peça, fechar o circuito elétrico e calibrá-lo tem sido problemas desafiantes. A calibração do sistema permite a obtenção da temperatura em função da ddp (diferencial de potencial), e para obtê-la, é necessário a utilização de um sistema de aquisição de dados para relacionar a temperatura com a ddp, obtendo a curva de calibração do sistema (Costa, 2014).

Nota-se nos trabalhos publicados que faltam realizar comparações entre medições de temperatura e realizar mais calibrações no próprio sistema que será utilizado como bancada experimental.

2. MÉTODO DO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

A determinação das temperaturas próximas à aresta de corte da ferramenta na usinagem convencional é de grande complexidade técnica. Para isto, foram criados inúmeros métodos experimentais, como por exemplo o método do termopar ferramenta-peça. O termopar pode ser definido como um sistema formado por dois condutores metálicos distintos, sendo puros ou de ligas homogêneas e é o sistema mais utilizado para medição de temperatura.

O método do termopar ferramenta-peça utiliza o mesmo princípio do termopar e mede a temperatura da interface cavaco-ferramenta por meio do fenômeno físico denominado “efeito Seebeck”. A experiência mostra que um circuito constituído por dois materiais diferentes é percorrido por uma corrente elétrica “i” desde que os contatos ou junções destes materiais estejam a temperaturas diferentes. Um circuito deste tipo, denominado par termoeletrico ou termopar, é uma fonte de força eletromotriz. O valor desta força eletromotriz gerada depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre os dois contatos. Utilizando o princípio do “efeito Seebeck”, a temperatura de usinagem pode ser medida. O material da peça e o material da ferramenta constituem um termopar, desde que sejam condutores elétricos e fabricados em materiais diferentes. Isto ocorre porque, durante a usinagem, a zona de aderência entre a ferramenta e o cavaco garante a formação de uma junção (junta quente ou de medição). Uma conexão elétrica para uma parte de menor temperatura da ferramenta forma a junção fria (junta fria ou de referência) (Kaminise, 2012).

Fundamentado nesse princípio, o método termopar ferramenta-peça utiliza a ferramenta e a peça como par termoeletrico. A interface entre a ferramenta e a peça é considerada a junção quente do termopar, enquanto a junção fria é formada pelos pontos mais afastados da ferramenta e da peça, que devem ser conectadas eletricamente e mantidas a uma temperatura constante de referência (Stephenson e Agapiou, 2006). Sendo assim a diferença de potencial (ddp) gerada será relacionada diretamente a temperatura na interface ferramenta-peça, desde que a temperatura de referência não varie.

A Figura 1 mostra um esquema geral do método do termopar ferramenta-peça. O contato da peça com a ferramenta representa a junta quente. O circuito é completado através de uma contra ponta adaptada para possibilitar o contato elétrico da peça com o fio de cobre.

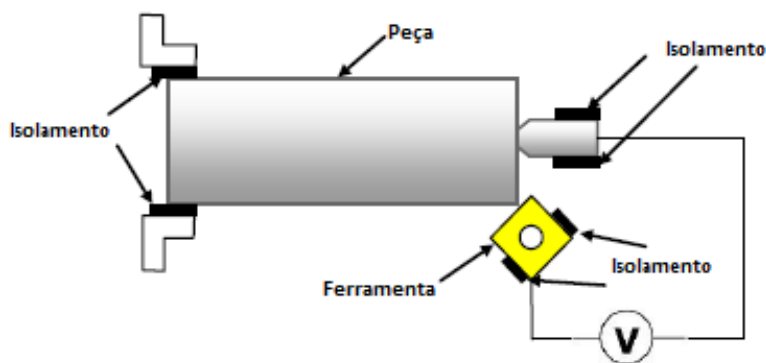


Figura 1. Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem (adaptado de Moura *et al.*, 2015)

A técnica, apesar de aparentemente simples, possui uma série de particularidades que devem ser levadas em conta durante sua utilização e montagem. Dentre elas podem-se citar: o par ferramenta-peça deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade, impedindo assim a utilização de ferramentas cerâmicas e peças de materiais não metálicos; a temperatura medida representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte, sendo assim não é possível obter a temperatura máxima da ferramenta na interface cavaco ferramenta ou na ponta da ferramenta; o contato da ferramenta com o cavaco não é estável, existem picos e vales nesta região; a junção quente pode ser considerada como um termopar finito, com um grande número de fontes interligadas em um circuito em paralelo; e a calibração do termopar é difícil pois depende de todos os materiais presentes no sistema e varia para cada material que será usinado (Melo, 1998).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais consistiram de usinagem utilizando o processo de torneamento cilíndrico externo de uma peça de liga de titânio (Ti-6Al-4V), a seco e com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante). Os testes de usinagem foram realizados em um torno eletrônico universal com rotação máxima de 2500 rpm e potência de 7,46 kW.

Um sistema de MQL foi utilizado com pressão de 3 bar e uma vazão de 60 ml/h aproximadamente. Foi utilizado somente um tubo posicionado a 90° da superfície de saída da ferramenta. O fluido utilizado foi o *Quimatic Jet*, um fluido integral sintético a base de água, indicado para a técnica de MQL.

A ferramenta utilizada no torneamento da liga de titânio foi o metal duro da classe K10 sem revestimento, fabricada em forma de barra, com seção transversal de 10 x 10 mm e 100 mm de comprimento. Após a afiação a ferramenta adquiriu a seguinte geometria: ângulo de posição principal (χ_r) de 75°, ângulo de posição secundário (χ_r') de 15°, ângulo de folga principal e secundário (α_o e α_o') de 5° e ângulo de saída (γ_o) de 0°.

A contra ponta modificada utilizada neste experimento consiste em uma montagem na qual mercúrio é adicionado dentro de uma cápsula de Teflon® que é encaixada no interior do cone Morse da contra ponta modificada com a finalidade de permitir uma continuidade do sinal elétrico no decorrer dos testes.

De acordo com Kaminise (2012), nessa configuração, o circuito elétrico é mantido entre a ponta rotativa e uma haste instalada na carcaça da contra ponta modificada com isolamento elétrico da mesma. Ambas, a ponta rotativa e a haste foram feitas de um mesmo material (SAE 1050) e, assim, formou-se a junção pelos mesmos materiais e o mercúrio sem gerar ddp prejudicial (2ª lei dos termopares). Na Figura 2 são exibidos os componentes do contra ponta.

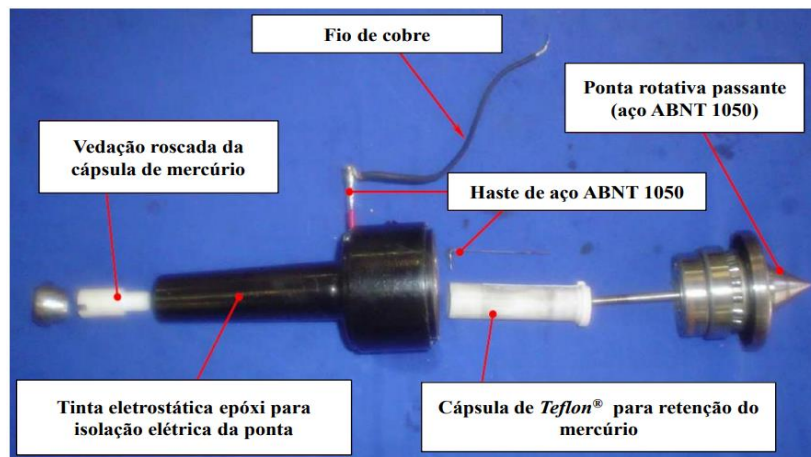


Figura 2. Contra ponta modificada utilizada no método termopar ferramenta-peça (Kaminise, 2012)

Sabe-se que pela 2ª lei dos termopares, quando a junção é formada pelo mesmo material, mesmo que haja variação de temperatura não existirá variação de ddp. Pensando em uma alternativa que não necessite de mercúrio e que não adicione nenhum tipo de ddp prejudicial no sistema, foi fabricado um sistema com um pino do mesmo material do corpo de prova para fechar o sistema elétrico, para assim verificar se o mesmo irá gerar ddp prejudicial que interfira no resultado. Para efeito de comparação, os dois sistemas foram utilizados.

Este sistema foi fabricado com um suporte de aço trefilado de Ø12,7 mm x 300 mm, sendo que um trecho de 230 mm teve a seção reduzida para Ø8,7 mm para ser possível fixá-lo a uma base magnética posicionada em cima do cabeçote fixo do torno. O suporte possui um furo de Ø10,7 mm x 60 mm na outra extremidade para permitir que o pino da liga de titânio Ti-6Al-4V de Ø5 mm x 100 mm fosse fixado. Para não adicionar uma junta secundária com o material do suporte, foi instalado uma cápsula de Teflon® de Ø10,7 mm x 60 mm no furo do suporte. Essa cápsula de Teflon tem um furo de Ø5,5 mm x 40 mm onde foi instalado uma mola helicoidal Ø4,2 mm x 22 mm utilizada para pressionar o pino contra o corpo de prova rotativo na parte mais próxima das placas do torno.

3.1. Calibração do sistema termopar ferramenta-peça

A calibração do sistema termopar-ferramenta-peça é o ponto chave para se realizar as medições de temperatura por este método. É através da calibração do sistema que é possível relacionar a diferença de temperaturas na interface ferramenta-peça e a temperatura ambiente com o seu respectivo valor de variação da ddp, devido ao efeito Seebeck.

Uma alternativa utilizada por Kaminise (2012) e Costa (2014) é de se utilizar um maçarico a gás de oxiacetileno para fornecer o calor na junta de medição, porém o mesmo apesar de ser muito eficiente pelo fato de realizar a calibração no próprio sistema de medição, garante uma calibração confiável somente até cerca de 800 °C, sendo que

nesse trabalho o sistema será calibrado até 1000 °C. Para realizar a calibração, o sistema foi montado no torno onde foram realizados os testes, com o corpo de prova de Ti-6Al-4V já montado.

Para representar o torneamento, soldou-se um cavaco longo da liga Ti-6Al-4V (e posteriormente um fio comercial de 1,7 mm de diâmetro da mesma liga) na extremidade que está dentro do forno de uma barra de metal duro com as mesmas composições da ferramenta e na outra extremidade foi soldado um fio de cobre para conectar ao multímetro. Já a outra extremidade da liga de titânio foi soldada a peça que está montada no torno, que é ligada ao contra ponta modificada, que do mesmo sai um fio de cobre para o multímetro. Para monitorar a temperatura dentro do forno foi soldado um termopar do tipo K próximo a junta entre o cavaco e a barra de metal duro através de descarga capacitiva.

Para a aquisição do sinal de temperatura do termopar tanto na calibração do método quanto nos experimentos de usinagem foi utilizado o sistema de aquisição de sinais Agilent® 34901A, do fabricante KEYSIGHT®, com resolução de 1 µV e incerteza de medição de 0,3 °C, operado através do programa Agilent® BenchLink Data Logger.

Após toda a montagem experimental, o forno foi aquecido até a temperatura de 1000°C, aquecendo assim a junção entre a ferramenta e o cavaco (junta de medição). Os dados foram adquiridos pelo *Agilent®* e transmitidos ao computador, possibilitando a obtenção da curva de calibração do sistema utilizando como matéria prima da peça o Ti-6Al-4V. Pode-se ver o sistema na Fig. 3.

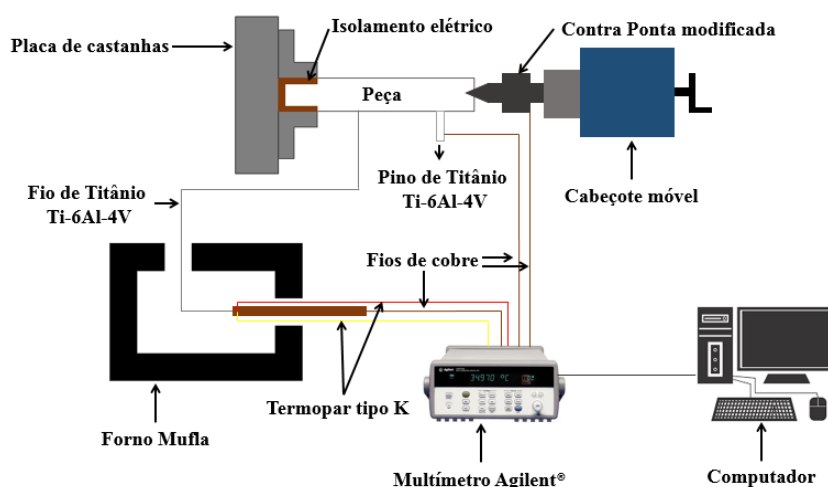


Figura 3. Desenho esquemático do sistema de calibração

3.2. Medição de temperatura de usinagem

Para a medição da temperatura durante a usinagem, o pino, a ferramenta e o contra pontas são conectados ao sistema de aquisição através de fios de cobre. É importante garantir que todas estas três conexões estejam na mesma temperatura da realização da calibração. Na Figura 4 é apresentado um desenho esquemático do sistema de medição de temperatura desenvolvido neste trabalho.

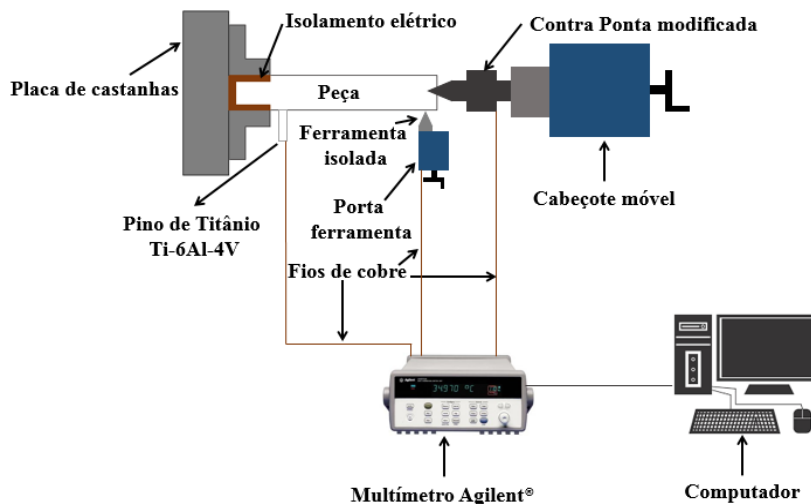


Figura 4. Desenho esquemático do sistema de medição de temperatura

Para que não ocorresse a fuga de ddp, a barra de titânio e o suporte da ferramenta de metal duro foram montadas no torno e devidamente isoladas para os testes.

A ddp gerada durante o torneamento, que é proporcional a diferença entre a temperatura na interface ferramenta-peça e a temperatura ambiente, foi adquirida da mesma forma que foi feita a calibração. A aquisição de sinal é feita através do fio de cobre com uma taxa de aquisição de uma aquisição por segundo. Quando a ddp fica estável, mede-se a ddp por 10 segundos, e após isso a usinagem é interrompida e utilizando a média dos valores obtidos o programa de computador estabelece a relação da ddp com a real temperatura da interface.

A temperatura de usinagem foi medida três vezes para cada condição de corte e a aquisição nos dois circuitos (pino e contra ponta modificada) foram feitos de forma simultânea. Foi realizado um teste, executando a aquisição dos dois circuitos de forma separada também para constatar que não havia diferença significativa entre realizar a medição de forma separada ou simultânea.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração do Sistema Termopar Ferramenta-Peça

Neste trabalho 3 calibrações foram realizadas para cada circuito, obtendo assim seis calibrações no total. Isso evitou a existência de variações muito discrepantes entre um ensaio e outro.

Nas figuras 5 e 6, as curvas C1, C2 e C3 representam o circuito utilizando a contra ponta modificada e as curvas C4, C5 e C6 representam o circuito utilizando o pino de Ti-6Al-4V.

As curvas C1 e C4 foram montadas utilizando um cavaco de titânio Ti-6Al-4V unido a barra de metal duro K10 através de uma resina específica. As grandes dificuldades iniciais nesse caso foram a obtenção do cavaco contínuo com dimensões adequadas para a montagem e a união deste cavaco com o metal duro, pois a descarga capacitiva não se mostrou eficaz para a soldagem. Além disso, foi possível obter nessa calibração temperaturas até 600 °C, pois acima dessa temperatura a união entre o cavaco e a barra de metal duro eram desfeitas.

As curvas C2 e C5 foram montadas utilizando um fio comercial da liga de titânio Ti-6Al-4V de 1,7 mm de diâmetro. O cavaco longo da liga de titânio se mostrou muito frágil e de difícil obtenção. Sendo assim, o fio de titânio e a barra de metal duro foram ligados mecanicamente. Com esse aparato foi possível obter temperatura de calibração de até 800 °C, após esta temperatura os resultados foram sendo alterados, possivelmente devido a oxidação gerada no metal duro.

As curvas C3 e C6 foram obtidas utilizando um fio comercial da liga de titânio Ti-6Al-4V de 1,7 mm, porém nesse o fio de titânio e a barra de metal duro foram ligados através de brasagem, utilizando como elemento de união uma liga de cobre. A liga de cobre se mostrou mais eficaz em relação a liga de latão, pois possui ponto de fusão mais elevado. Com esse aparato foi possível obter temperaturas de calibração da ordem de 1000 °C. Após esta temperatura o sinal é interrompido, pois a ferramenta se deteriora devido a oxidação, desfazendo a união com o fio de titânio.

A Fig. 5 mostra o gráfico com as curvas de calibração utilizando a contra ponta modificada e na Fig. 6 são apresentadas as curvas utilizando o pino da liga de titânio.

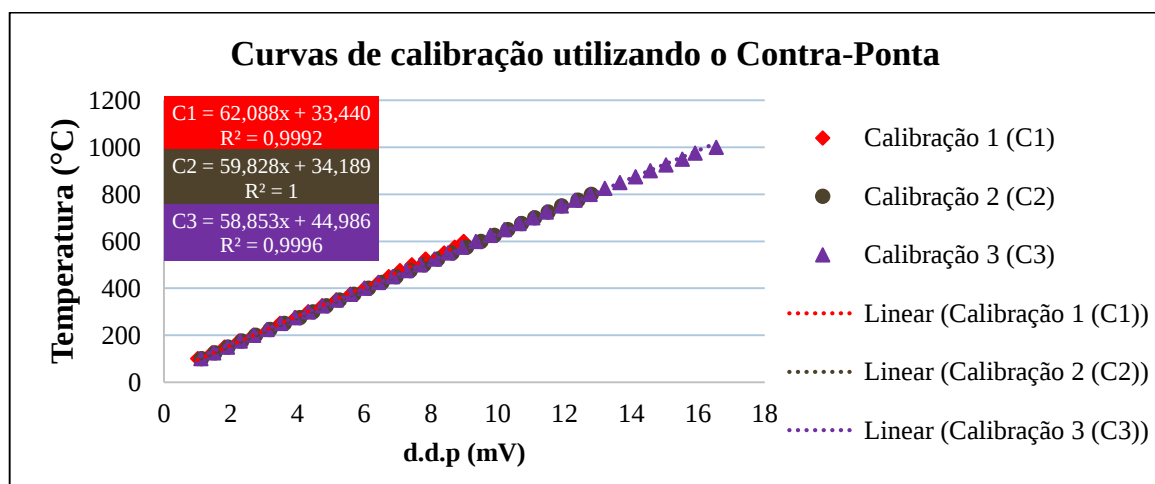


Figura 5. Curva de calibração do sistema de medição de temperatura utilizando a contra ponta modificada

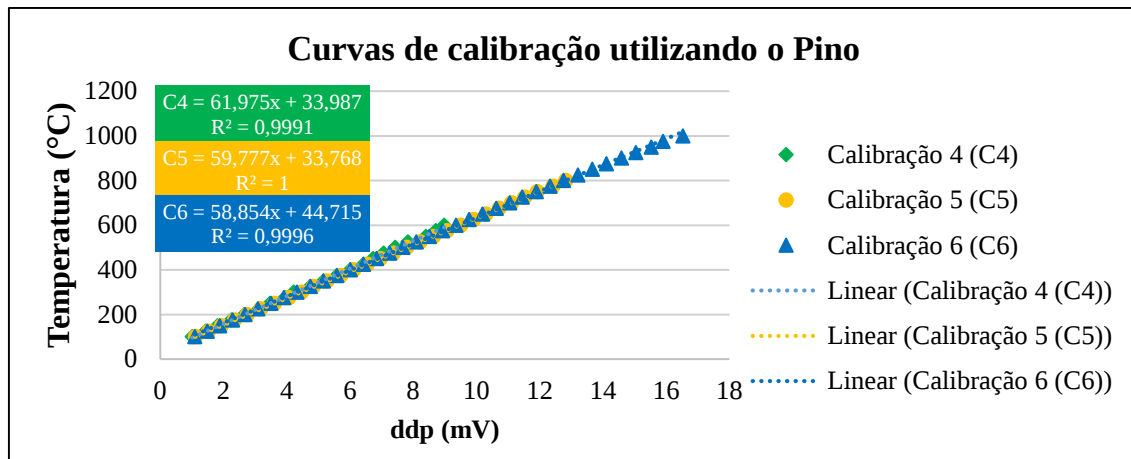


Figura 6. Curva de calibração do sistema de medição de temperatura utilizando o pino da liga de titânio Ti-6Al-4V

Observa-se que não houve diferença significativa entre as duas metodologias de calibração. Nota-se também que todas as curvas apresentam valores dos coeficientes de correlação (R^2) elevados ($> 0,99$), mostrando bom grau de ajuste do modelo linear obtido aos valores observados.

Nota-se que o valor máximo de temperatura que se conseguiu atingir foi de 1000°C (C3 e C6), sendo essas as calibrações utilizadas nos ensaios para medição de temperatura. As Equações 1 e 2 representam as funções que relacionam a temperatura com a ddp no circuito formado pela contra ponta modificada e pelo pino, respectivamente.

$$T_{cp} = 58,853V + 44,986 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

$$T_p = 58,854V + 44,715 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2)$$

Onde T_{cp} é a temperatura de usinagem obtida utilizando o circuito com a contra ponta modificada, T_p é a temperatura de usinagem obtida utilizando o circuito com o pino e V é a ddp (mV).

4.2. Medição de temperatura de usinagem

A Figura 7 apresenta o resultado dos testes de medição de temperatura de corte com variação da velocidade de corte entre 20 e 70 m/min, avanço de 0,05 até 0,30 mm/rot e profundidade de usinagem de 0,075 até 1 mm.

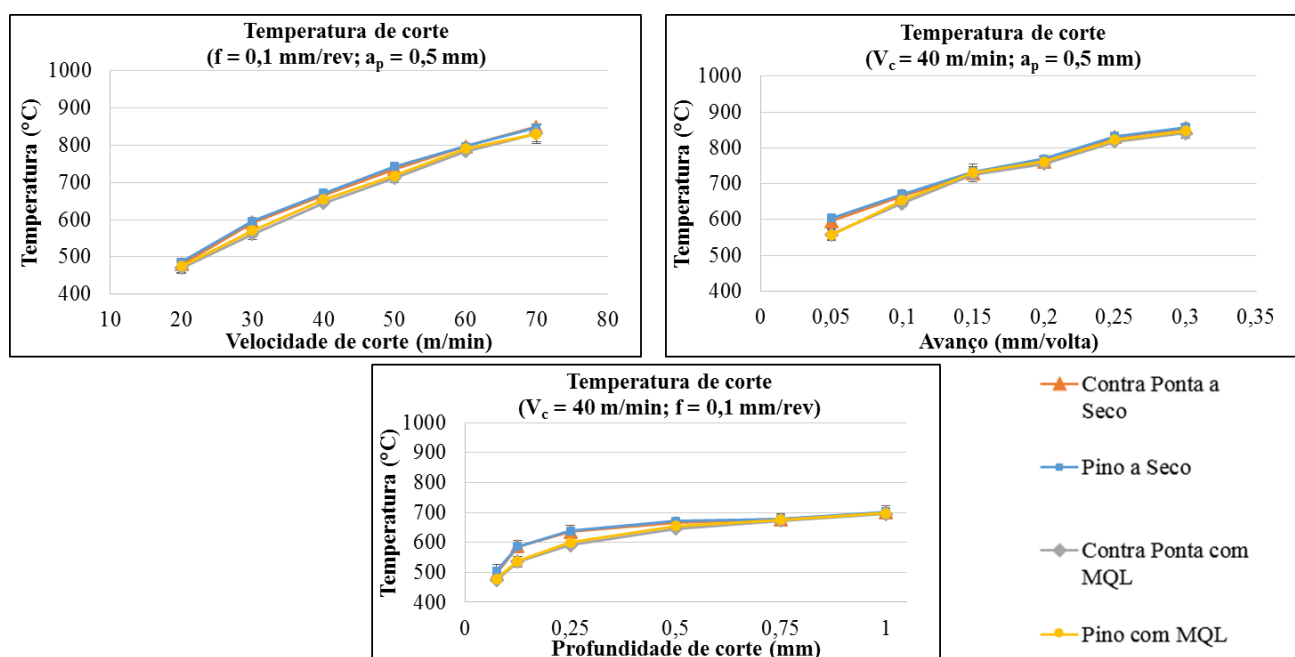


Figura 7. Temperatura de usinagem em função dos parâmetros de corte

A diferença média entre os resultados obtidos com a contra ponta modificada e pino foi de 4,65 °C, sendo que a maior diferença foi de 9,35 °C, para as mesmas condições. Para quase todos os testes a temperatura obtida com o pino foi ligeiramente maior, possivelmente devido ao efeito do atrito gerado. Isto mostra que os dois métodos são válidos e que o atrito gerado no pino tem pouco efeito no resultado final da temperatura. Em relação as três repetições, o desvio padrão médio foi de 5,1 °C o que demonstra alta repetibilidade do processo de medição de temperatura utilizado.

Os resultados mostraram que a temperatura de usinagem aumenta com o aumento da velocidade de corte e avanço de forma quase linear, pelo menos na faixa de temperaturas entre aproximadamente 500 °C e 850 °C. Em relação a profundidade de usinagem ocorreu também um aumento porém não de forma linear. O gráfico sugere que a taxa de aumento da temperatura é alta para baixas profundidades de corte, abaixo de 0,25 mm aproximadamente. A partir deste valor a temperatura tende a estabilizar em 700 °C, para as condições utilizadas. Já o corte utilizando MQL obteve valores de temperatura sempre menores que os realizados a seco, possivelmente devido ao seu efeito lubri-refrigerante na interface cavaco-ferramenta.

A menor temperatura obtida foi 469,9 °C para $V_c = 20$ m/min, $f = 0,1$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm, com MQL, e a maior temperatura obtida foi 857,23 °C para $V_c = 40$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm, com usinagem a seco.

São apresentados na Tabela 1 os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA), onde a partir de um planejamento fatorial 2^k foi realizado a análise estatística visando avaliar os efeitos das condições de corte sob a temperatura de usinagem. Foram analisados cinco fatores com 2 níveis cada: influência do sistema de medição (pino ou contra ponta modificada), tipo de lubri-refrigeração (seco e MQL), velocidade de corte (40 e 60 m/min), avanço (0,1 e 0,2 mm/rot) e profundidade de usinagem (0,25 e 0,50 mm). O nível de confiança adotado foi de 95% com um nível de significância de 5%. Para valores de $p < 0,05$ os fatores têm influência e se $p > 0,05$, não tem influência estatística.

De acordo com os dados mostrados na Tab. 1, pode-se observar que o tipo de circuito (pino e contra ponta modificada) não tem influência estatística nos resultados. Esse fato confirma a validade dos dois métodos de medição utilizados. Todos os outros parâmetros de corte demonstraram ter influência na temperatura de usinagem. Além disso a combinação entre avanço e profundidade de usinagem (4 e 5) demonstraram também ter influência estatística. Esse comportamento está de acordo com a literatura, pois há um significativo aumento da área da zona secundária de cisalhamento, que é dependente diretamente da profundidade de usinagem e do avanço. Tal fator proporciona um aumento na taxa de geração de calor pois uma porção maior do material irá sofrer deformação plástica acarretando um aumento no calor transformado pelo processo. Isto pode sugerir também que a temperatura medida através do método do termopar ferramenta-peça é a temperatura média da interface cavaco ferramenta e não a temperatura máxima. No entanto, uma simulação numérica poderia ajudar a entender melhor este fato.

Tabela 1. Análise de variância (ANOVA) para a Temperatura de Usinagem

Fator	SQ	Grau de liberdade	Q.M	F	p
(1) Influência do sistema de Medição (Pino ou Contra Ponta Modificada)	65,967	1	65,967	0,413	0,529564
(2) Tipo de lubri-refrigeração (Seco ou MQL)	4768,287	1	4768,287	29,851	0,000052
(3) V_c (m/min)	192023,269	1	192023,269	1202,141	1,750E-16
(4) f (mm/volta)	87283,830	1	87283,830	546,431	8,532E-14
(5) a_p (mm)	16366,687	1	16366,687	102,462	2,319E-08
1 e 2	7,914	1	7,914	0,050	0,826674
1 e 3	20,032	1	20,032	0,125	0,727863
1 e 4	9,414	1	9,414	0,059	0,811273
1 e 5	19,036	1	19,036	0,119	0,734430
2 e 3	9,814	1	9,814	0,061	0,807388
2 e 4	4,221	1	4,221	0,026	0,872896
2 e 5	578,652	1	578,652	3,623	0,075149
3 e 4	177,540	1	177,540	1,111	0,307423
3 e 5	10,140	1	10,140	0,063	0,804287
4 e 5	2972,354	1	2972,354	18,608	0,000535
Erro	2555,751	16	159,734		
Total	306872,907	31			

5. CONCLUSÕES

As calibrações realizadas neste trabalho demonstraram ter resultados semelhantes entre si, apresentando valores dos coeficientes de correlação (R^2) elevados ($> 0,99$) e chegando a um valor máximo de calibração de 1000 °C. A oxidação no metal duro mostrou ser um fator negativo na calibração a partir de 800 °C.

O sistema já existente com a contra ponta modificada e o desenvolvido utilizando um pino de titânio demonstraram ter resultados semelhantes, apresentando uma diferença média de 4,65 °C, sendo que a maior diferença foi

de 9,35 °C, para as mesmas condições de usinagem. O mesmo vale para as repetições dos resultados de temperatura de usinagem obtidos que apresentaram um desvio padrão médio de 5,1 °C, o que demonstra alta repetibilidade do processo de medição de temperatura utilizado.

A temperatura de usinagem demonstrou tender a aumentar conforme o aumento dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) e a diminuir com a utilização do MQL em comparação com o corte a seco.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro às pesquisas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU/UFU).

7. REFERÊNCIAS

- Alvelid, B., 1970. Cutting Temperature Thermo-Electrical Measurements. In *Proceedings of the CIRP*, Vol. XVIII.
- Costa, I.S., 2014. *Usinabilidade do aço de corte fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Costa, I.S., 2019. *Uso de Calorimetria para Estimativa da Distribuição do Calor Gerado no Processo de Furação de Ferro Fundido*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Da Silva, M.B. e Wallbank, J., 1999. Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, p. 195–202.
- Kaminise, A.K., 2012. *Estudo da Influência do Material do Porta-ferramenta sobre as Temperaturas de Usinagem no Torneamento*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Machado, Á. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Da Silva, M. B., 2011. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2ª Edição. São Paulo: Blucher.
- Melo, A. C. A., 1998. *Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Moura, R. R.; Machado, A. R.; Da Silva, M. B., 2015. The Effect of Application of Cutting Fluid with Solid Lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, Vol. 332-333, p. 762-771.
- Shaw, M. C., 2005. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition, Great Britain.
- Stephenson, D. A. e Agapiou, J. S., 2006. *Metal Cutting Theory and Practice*. 2nd edition, London.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho

TEMPERATURE MEASUREMENT IN EXTERNAL CYLINDRICAL TURNING OF THE TI-6AL-4V ALLOY

Renato Nunes Cunha

Márcio Bacci da Silva

Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 10, Sala 2B, Campus Santa Mônica, CEP 38400-089, Uberlândia.
renatonc@ufu.br, mbacci@ufu.br

Abstract. The study of machining processes for difficult-to-cut materials, such as titanium, has an important role in understanding the accelerated wear that affects tool life due to high process temperatures. Thus, this work aims to investigate the influence of cutting parameters on the chip-tool interface temperature measured by the tool-workpiece thermocouple method on the external cylindrical turning of the Ti-6Al-4V alloy. The work also aims to develop a methodology for calibrating the system, one of the major problems for using the method. The cutting tool used was the K10 grade carbide in the form of a properly sharpened bar. The results obtained in the calibration tests demonstrated a linear behavior in the relationship between temperature and electrical potential over the temperature range used in the calibration and obtained in the experimental tests. In addition, the calibration using the modified counter tip and the pin developed in the present work, demonstrated similar results. In the cylindrical turning tests, the cutting parameters (cutting speed, feed and cutting depth) and the lubrication-cooling condition (dry or MQL) were varied. The results obtained show that the cutting parameters directly influence the machining temperature.

Keywords: Turning. Titanium. Machining temperature. Tool-piece thermocouple method.

RESPONSIBILITY NOTICE

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