



ANÁLISE DA TEMPERATURA DE CORTE NO FRESAMENTO DE TOPO

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, leonardo.rss@gmail.com
Augusto César Santos Peixoto, augusto-csp@hotmail.com
Felipe dos Anjos Rodrigues Campos, filipin_anjos@hotmail.com
Felipe Chagas Rodrigues de Souza, felipechagaslepu@gmail.com

Universidade Federal de Uberlândia – 2121, João Naves de Avila avenue, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, 1º bloco – Uberlândia, Brasil.

Resumo. Este trabalho tem como finalidade investigar as temperaturas resultantes em regiões próximas a zona de corte e sua correlação com a potência de usinagem e rugosidade no processo de fresamento de topo para diferentes condições de usinagem. As temperaturas foram mensuradas através de uma termocâmara, sendo proposta uma metodologia de calibração da emissividade da mesma para permitir maior acurácia dos resultados. Uma vez que as fontes de calor no processo de usinagem são o atrito e a deformação plástica, serão também correlacionadas as variáveis de saída com as propriedades mecânicas de cada material.

Palavras chave: Temperatura de corte, Fresamento de topo, Termocâmara, Usinagem.

1. INTRODUÇÃO

Em virtude das crescentes pressões por motores a combustão interna mais eficientes intensificou-se a busca por novas técnicas e materiais que possam aumentar a eficiência energética dos mesmos. Dentre as medidas para se aumentar esta eficiência energética destacam-se a utilização de maiores taxas de compressão e a diminuição do peso dos motores, sendo assim necessária a busca por novos materiais que suportem ambas estas requisições, sendo cada vez mais dado destaque ao ferro fundido vermicular (CGI) (Da Silva et al., 2019).

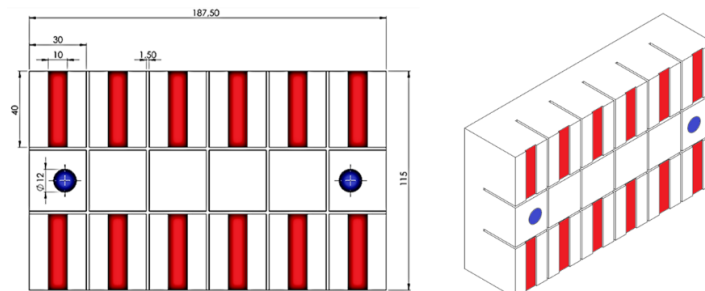
O presente trabalho tem como finalidade comparar resultados de força de usinagem, temperatura na região de corte e rugosidade previamente investigados por Da Silva, L. R. R. et al. (2018) com as variáveis mecânico-metalúrgicas dos materiais, procurando assim entender a correlação destes parâmetros com a usinabilidade destes materiais, bem como identificar quais variáveis podem ser utilizadas como indicadores de usinabilidade. O foco deste trabalho é na investigação da temperatura de corte e sua correlação com a potência de usinagem e rugosidade no processo de fresamento de topo para diferentes condições de usinagem. Os materiais são 3 tipos de CGI: o CGI-A é de classe 450, os CGI-B e CGI-C são de classe 500, possuindo ambos grafita refinada, sendo ao CGI-C adicionado 0,1% de Mo.

2. METODOLOGIA

2.2. Preparação do corpo de prova

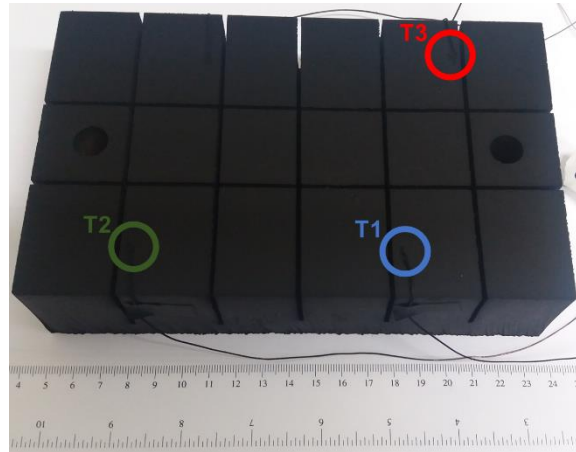
Um problema comum encontrado nos ensaios de medição de temperatura são as diferenças nas condições de contorno entre os ensaios nas bordas e no centro dos corpos de prova, as quais influenciam diretamente a distribuição de temperaturas do processo. Para evitar este problema o corpo de prova foi seccionado conforme ilustrado na Figura 1. Esta configuração permite que cada ensaio seja individualizado, uma vez que a região a ser usinada (representada em vermelho) está separada da vizinha por um vão de 1,5 mm, produzido por usinagem de jato d'água abrasivo.

Figura 1. Representação do corpo de prova utilizado nos ensaios de temperatura. Dimensões em milímetros.



Termopares do tipo T foram soldados por descarga capacitiva em atmosfera inerte a aproximadamente 6 mm da zona de corte. Estes termopares foram calibrados a temperaturas entre 20 e 70 °C, usando um banho termostático modelo MQBTC A-100, fabricado pela Microquímica® Equipamentos LTDA, com resolução de 0.1 °C e estabilidade de 0.01 °C. A peça foi então pintada com uma tinta de baixo ponto de fusão na coloração preto-fosco, com a finalidade de evitar que a reflexão de luz sobre a peça seja confundida com a emissividade da mesma. A peça com os termopares fixados (indicados por círculos vermelhos) e a camada de tinta aplicada é ilustrada na Figura 2. A finalidade desta configuração experimental é a de calibrar a emissividade da peça por meio da comparação direta da temperatura indicada pelo termopar e a temperatura do pixel da termocâmera correspondente a mesma posição.

Figura 2. Corpo de prova com termopares fixados e tinta anti-reflexiva aplicada.



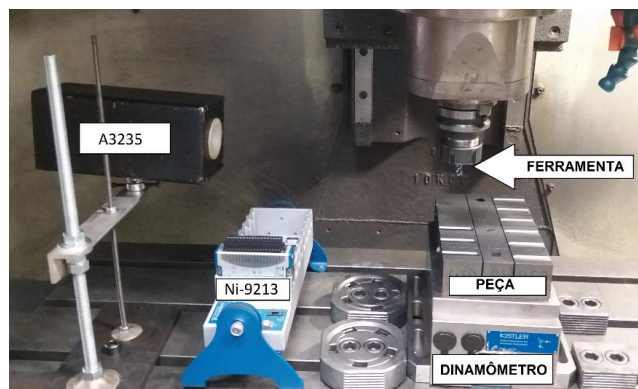
2.3. Ensaios de Usinagem

Os ensaios de usinagem foram realizados no mesmo centro de usinagem CNC ROMI Bridgeport Discovery® 720. A configuração experimental para os ensaios é ilustrada na Figura 3. Para mensurar as forças de usinagem utilizadas para calcular a potência de usinagem o corpo de prova foi colocado sobre uma plataforma dinanométrica Kistler®, modelo 9265B, fixada por parafusos M12 nas regiões em azul indicadas na Figura 1. A potência de usinagem for mensurada de acordo com a Equação 1, onde F_r é a força resultante nos três eixos, v_e a velocidade efetiva de corte e η o coeficiente de rendimento da máquina. De maneira concomitante a potência de corte foi também mensurada pelo produto do sinal de sensores de tensão e corrente por efeito hall em função do tempo, conforme indicado pela Equação 2, seguindo a metodologia proposta por da Silva et al. (2017), onde T é o tempo de aquisição dos dados, $i(t)$ a corrente instantânea e $v(t)$ a tensão instantânea. Os valores de potência elétrica mensurados foram posteriormente subtraídos dos valores de potência de funcionamento da máquina, resultando assim em uma maior aproximação da potência elétrica real consumida durante o corte.

$$P_c = \frac{F_r v_e}{60\eta} \text{ (W)} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot v(t) dt \quad (2)$$

Figura 3. Configuração experimental.



Os termopares indicados na Figura 2 foram conectados a placa de aquisição Ni-9213, para calibração da emissividade do corpo de prova. Para aquisição da temperatura nas proximidades da zona de corte foi utilizada uma camera termográfica (TC) modelo A325 da FLIR Tools® com resolução de 320x240 pixels, em uma escala de medição de 0 a 350 °C com acurácia de ± 2 °C. As imagens térmicas foram adquiridas a uma taxa de 30 quadros por segundo. A câmera foi fixada a esquerda do corpo de prova a uma distância de 400 do mesmo, fazendo assim que não haja movimento relativo entre ambos minimizando perdas de foco.

Como ferramenta de corte foram utilizados as fresas integrais. Foram fixados uma profundidade de corte $ap = 1$ mm, uma largura de corte $ae = 10$ mm (todo diâmetro da ferramenta) e um comprimento de corte $vf = 40$ mm, conforme a Figura 1. Com a finalidade de minimizar os efeitos do desgaste das ferramentas nos resultados das medições, as mesmas eram trocadas antes que o seu desgaste máximo de flanco (VBBmax) chegasse a 0.05 mm.

O planejamento experimental utilizado para cada um dos três materiais (CGI) avaliados é apresentado na Tabela 1, sendo realizadas 2 réplicas por condição. Todos os ensaios foram realizados a seco, uma vez que a utilização de lubrificação dificultaria a análise termográfica da zona de corte. Após os ensaios a rugosidade da superfície foi mensurada usando um rugosímetro da fabricante Taylor Hobson® modelo S100, com um raio de ponta de 0.2 μ m. Foram realizadas três medições por percurso usinado, com um comprimento amostral de 25,6 mm. O perfil foi tratado com um filtro Gaussiano de 0.8 μ m, sendo utilizada a rugosidade média do perfil (Ra) utilizada como parâmetro de comparação.

Tabela 1. Parâmetros de Usinagem.

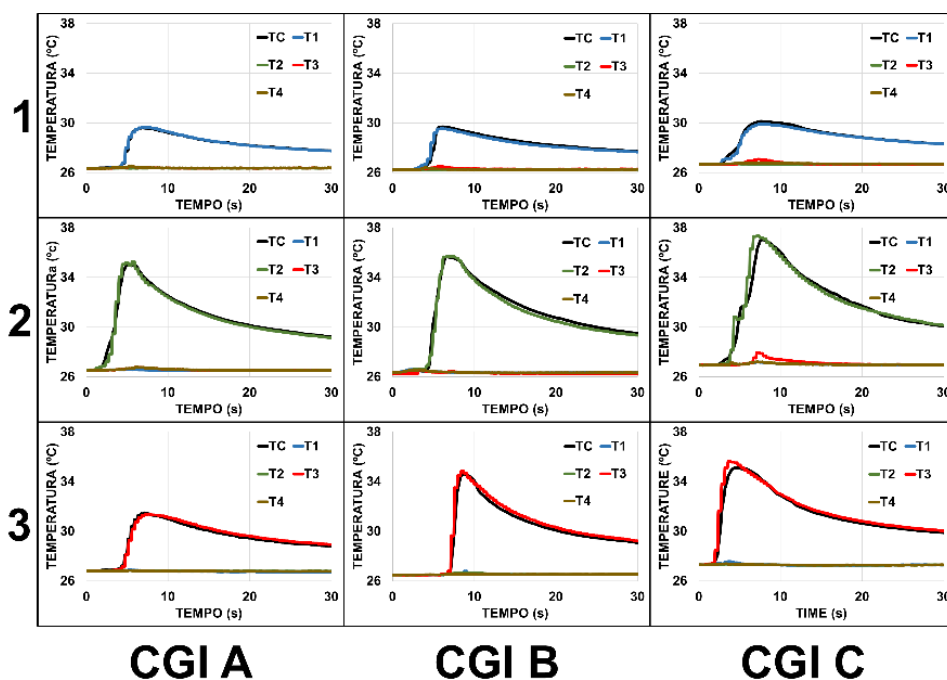
Condição	Vc (m/min)	f (mm/rev)
1	120	0,1
2	120	0,2
3	240	0,1

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Calibração da Emissividade do Corpo de Prova

Os resultados das medições de temperatura e da região análoga na imagem termográfica para cada uma das condições indicadas na Tabela 1 (eixo y) e cada um dos materiais é ilustrada na Figura 4, para uma emissividade de $\epsilon = 0.95$ (FLIR, 2015). As curvas T1, T2, T3 e T4 correspondem as termopares indicados na Figura 2, sendo TC a temperatura mensurada pela câmera termográfica no pixel correspondente a posição do termopar. Para todas as condições avaliadas a temperatura dos termopares apresentou uma correlação superior a 90%. Estes resultados indicam que a emissividade indicada pelo fabricante para esta tinta foi corretamente imputada, aumentando a confiabilidade dos valores de temperatura mensurados pela camera termográfica.

Figura 4. Comparação das medições de temperatura dos termopares e da termocâmera.



3.2. Medição da potência de usinagem utilizando Dinamômetro e Sensores Hall

Os valores de potência de usinagem mensuradas pelas Equações 1 e 2 para os materiais avaliados em cada condição de usinagem da Tabela 1 são ilustradas na Figura 5, sendo a análise de variância para ambas as técnicas de medição apresentadas na Tabela 2. A medições de potência por ambas as técnicas apresentaram um erro médio inferior a 6%, indicando o potencial da utilização dos sensores de potência elétrica como alternativa de baixo custo aos dinamômetros no mensuramento de potência de usinagem.

Figura 5. Potência de usinagem para cada uma das condições avaliadas. a) Dinamômetro; b) Sensor Hall. (Da Silva, 2018)

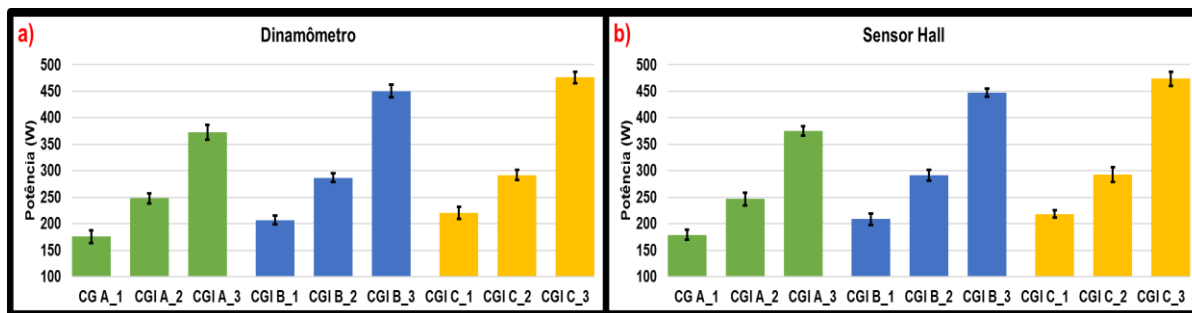


Tabela 2. Análise de variância para a potência de usinagem.

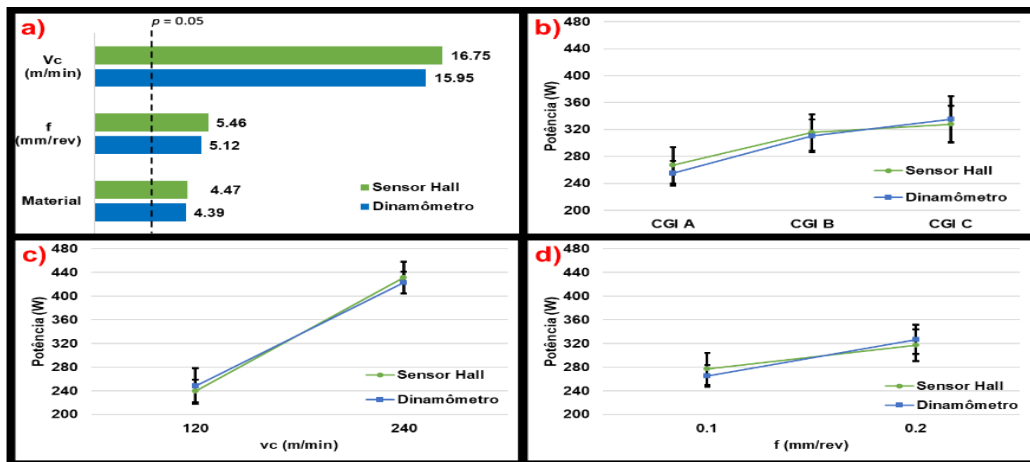
Fator	Dinamômetro					Sensor Hall				
	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p
Material	6706.08	2	3353.04	10.5927	0.025225	6293.66	2	3146.83	11.1780	0.023033
V_c	80553.24	1	80553.24	254.4779	0.000090	79013.03	1	79013.03	280.6669	0.000074
f	8302.25	1	8302.25	26.2278	0.006880	8377.61	1	8377.61	29.7586	0.005488
Erro	1266.17	4	316.54			1126.08	4	281.52		
Total SS	91965.38	8				89636.31	8			

Conforme indicado pela análise de variância da Tabela 2, todas as variáveis apresentaram significância estatística no processo. A variação de cada uma delas em relação a potência de usinagem para cada um dos métodos de medição é detalhada na Figura 6. O diagrama de Pareto (Figura 6a) indica que a velocidade de corte é a variável com maior influência na potência de usinagem, seguido pelo avanço e o material. Uma vez que a maior parte da energia necessária para visalhar o material é oriunda do eixo máquina, tanto em relação a velocidade efetiva de corte (v_e) na Equação 1, como em relação a potência elétrica consumida na Equação 2, este resultado já era esperado.

A potência de usinagem em relação ao tipo de material usinado (Figura 6b) variou de maneira diretamente proporcional as suas propriedades mecânicas (Figura 4). Isto pode ser explicado pelo fato de que as ferramentas eram trocadas antes que as diferentes taxas de desgaste impostas por estas diferentes propriedades mecânicas passassem a ter influência na potência de usinagem.

O efeito do avanço (Figura 6d) na potência de usinagem pode ser explicado pelo fato do avanço estar diretamente ligado com o volume de material a ser cisalhado por interação entre a ferramenta e a peça, logo quanto maior o avanço maior a potência requerida. Apesar de significativo, o baixo efeito do avanço em relação a velocidade de corte (Figura 6d) pode ser explicado pela menor contribuição cinética do avanço na v_e da equação 1 e pelo menor consumo de energia dos servo-motores utilizados para movimentar a mesa do centro de usinagem em relação ao eixo máquina para Equação 2.

Figura 6. Análise da influência das variáveis de entrada na potência de usinagem. a) Diagrama de Pareto; b) Efeito do material; c) Efeito da Velocidade de corte; d) efeito do avanço.



3.3. Rugosidade

Os valores de rugosidade para os materiais avaliados em cada condição de usinagem da Tabela 1 são ilustradas na Figura 7, sendo a análise de variância para estas variáveis apresentada na Tabela 3. Assim como para a potência de usinagem todas as variáveis apresentaram significância estatística. O efeito individual de cada variável de entrada é melhor detalhado na Figura 8.

Figura 7. Acabamento superficial para cada uma das condições avaliadas. (Da Silva, 2018)

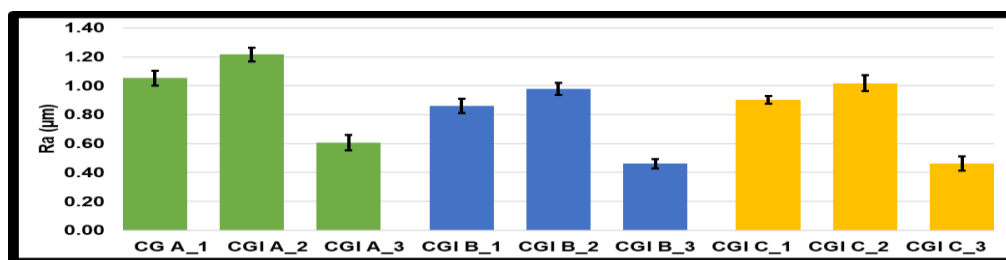


Tabela 3. Análise de variância para a rugosidade.

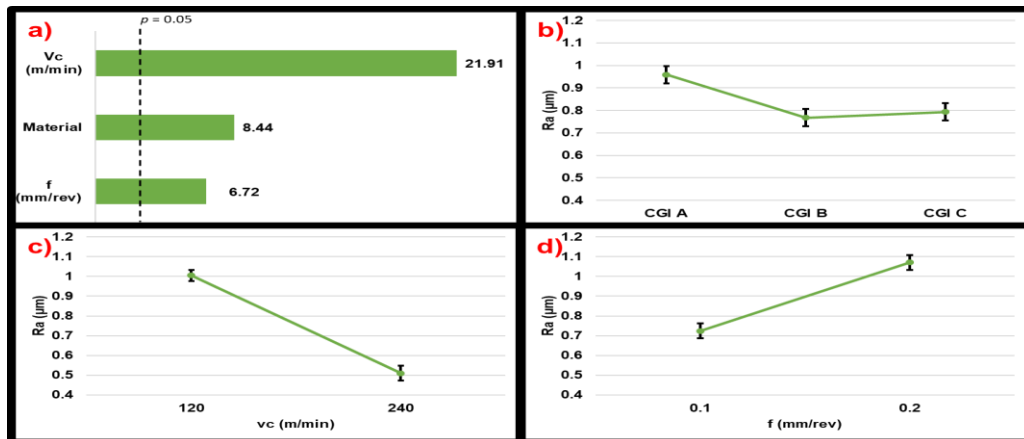
Fator	SS	df	Ra (μm)		
			MS	F	p
Material	0.064705	2	0.032352	56.3480	0.001175
Vc	0.275699	1	0.275699	480.1832	0.000026
f	0.025939	1	0.025939	45.1787	0.002551
Erro	0.002297	4	0.000574		
Total SS	0.581941	8			

A Figura 8a ilustra que apesar de todas as variáveis serem estatisticamente significativas para um intervalo de confiança de 95%, ao contrário do esperado o avanço apresentou a menor influência no acabamento. Em relação a influência do material do corpo de prova (Figura 8b), não observa-se diferenças estatísticas entre os CGIs B e C, contudo ambos apresentaram em média valores de rugosidade inferiores ao CGI A. Isso pode ser explicado com base no fato de ambos os materiais serem mais duros que o CGI A, o que resulta em menos fluxo lateral de material durante o cisalhamento como detalhado por Da Silva et al. (2019). Outra explicação é o refino das fases grafiticas resulta em melhor ancoramento das mesmas, e com isso o material se torna menos susceptível ao fenômeno do open-grain (SOUTO et al., 2002).

Uma hipótese para a elevada correlação entre a velocidade de corte e o acabamento superficial (Figura 8c) pode ser explicada com base na combinação das relativamente elevadas velocidades de corte utilizadas (3822 e 7643 rpm) e

menor rigidez de um corpo de prova montado sobre um dinamômetro em relação a uma peça montada diretamente sobre a mesa do centro de usinagem (Figura 3). O aquecimento gerado pela maior velocidade de corte, especialmente pelo fato da penetração de trabalho corresponder a todo diâmetro da ferramenta, diminui os esforços necessários para cisalhar o material (MACHADO et al., 2015b), podendo também reduzir a vibração oriunda das interações entre a ferramenta e a peça, melhorando assim o acabamento da superfície resultante. A taxa de avanço apresentou uma relação diretamente proporcional com a rugosidade da superfície usinada conforme previsto na literatura (TRENT; WRIGHT, 2013).

Figura 8. Análise da influência das variáveis de entrada na rugosidade. a) Diagrama de Pareto; b) Efeito do material; c) Efeito da Velocidade de corte; d) efeito do avanço.



3.4 Temperatura

Segundo Bergman e Incropera (2011), quanto mais próximo de uma fonte de calor, maior a taxa de queda do gradiente de temperatura entre esta fonte e as regiões adjacentes. Este fato explica as baixas temperaturas de usinagem encontradas usualmente no monitoramento de processos de usinagem por imagens termográficas (LAURO; BRANDÃO; RIBEIRO FILHO, 2013; SIMEONE et al., 2017), especialmente quando comparado com métodos de medição direta como o termopar ferramenta-peça (ZGÓRNIK; GRDULSKA, 2012; KUS et al., 2015; HEIGEL et al., 2017). Uma vez que cada pixel apresenta o valor médio da temperatura na região por ele compreendida, a usualmente baixa resolução das câmeras térmicas impossibilita a medição das relativamente pequenas áreas de contato entre a ferramenta e a peça. Esta acurácia, contudo, é maior para as regiões adjacentes a zona de corte onde a taxa de queda do gradiente de temperatura é menor, tornando a análise por imagens térmicas uma ferramenta vantajosa para a avaliação tanto da usinabilidade do material como de possíveis transformações metalúrgicas ocasionadas por aquecimento excessivo da peça.

Os valores da temperatura para os materiais avaliados em cada condição de usinagem da Tabela 1 são ilustradas na Figura 9, sendo a análise de variância para estas variáveis apresentada na Tabela 4. Assim como para a potência e rugosidade, todas as variáveis de saída se mostraram estatisticamente significativas para o processo para um intervalo de confiança de 95%. A análise dos desvios padrões da Figura 9 ilustra que, independente do material usinado, o desvio padrão sempre foi maior na condição de usinagem 2 (Tabela 1). Este fato pode ser explicado com base na Figura 10, a qual apresenta os frames contendo o pixel de maior temperatura para cada condição de usinagem investigada. A condição 2, por apresentar maior taxa de avanço, apresenta cavacos com maior volume. O maior volume destes cavacos dissipa mais energia no seu desprendimento, retirando mais energia térmica da interface de corte e com isso fazendo com que a temperatura oscile mais.

Figura 9. Acabamento superficial para cada uma das condições avaliadas. (Da Silva, 2018)

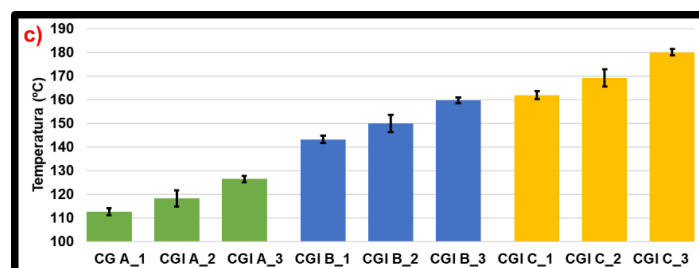
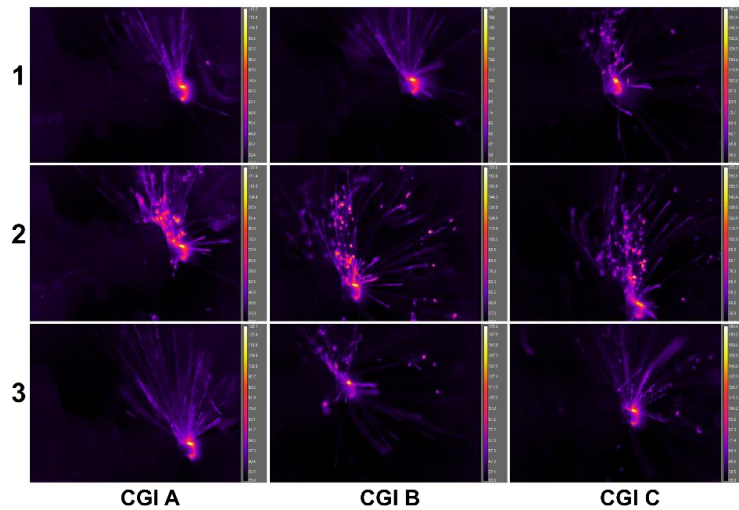


Tabela 4. Análise de variância para a Temperatura.

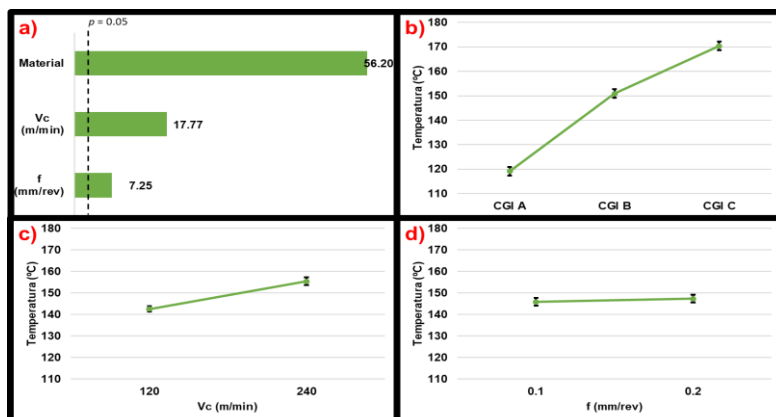
Fator	Temperatura (°C)				
	SS	df	MS	F	p
Material	4005.721	2	2002.860	1609.844	0.000002
V_c	392.850	1	392.850	315.762	0.000059
f	65.472	1	65.472	52.625	0.001917
Erro	4.977	4	1.244		
Total SS	4407.958	8			

Figura 10. Frame contendo o pixel de maior temperatura para cada condição de corte avaliada.(Da Silva, 2018)



A Figura 11 ilustra com maior detalhamento a influência das variáveis de entrada do processo na temperatura. A Figura 11a indica que a temperatura nas proximidades da zona de corte foi muito mais sensível as variações de material que da velocidade de corte. Este fato pode ser explicado com base na maior parte do calor gerado pelo atrito e cisalhamento estar contido na interface ferramenta-peça, no qual conforme discutido *lém aridade*, a termocâmera tem pouco acesso devido a sua relativamente baixa resolução. Sendo assim, quando este calor se dissipa, a energia extra necessária para cisalhar os materiais de maiores propriedades mecânicas é melhor percebida com a variação do material usinado, conforme a Figura 11b. Outro ponto para a elevada influência do material nas temperaturas registradas é a maior *lém aridade* dos CGIs B e C, a qual *lém* de contribuir para aumentar a dureza e tenacidade destes materiais em relação ao CGI A, também resultam em uma menor dissipação de calor para o ambiente [40]. O avanço apresentou a menor correlação com a temperatura, uma vez que esta variável imputa menos energia no processo que a velocidade de corte e seus efeitos quanto a temperatura também se concentram mais na interface ferramenta-peça.

Figura 11. Análise da influência das variáveis de entrada na temperatura. a) Diagrama de Pareto; b) Efeito do material; c) Efeito da Velocidade de corte; d) efeito do avanço.



4. CONCLUSÕES

Nesta seção a usinabilidade dos materiais foi avaliada quanto a potência, rugosidade e temperatura de corte. Dos resultados podem ser destacadas as seguintes conclusões:

1. A metodologia de calibração da emissividade do corpo de prova utilizando termopares do tipo T se mostrou satisfatória para aumento da acurácia dos resultados.
2. A metodologia de seccionamento dos corpos de prova se mostrou efetiva para o isolamento das condições de contorno para cada réplica.
3. A utilização de sensores Hall se mostrou uma alternativa viável para o monitoramento da potência de usinagem ao apresentar resultados similares aos obtidos através do uso de um dinamômetro.
4. O aumento de dureza e nodularidade resultou em aumento da potência de corte e das temperaturas nas regiões adjacentes a interface ferramenta-peça.
5. Não observou-se diferenças estatísticas significativas para os valores de R_a entre os CGIs B e C.
6. Ambos os CGIs B e C apresentaram valores de rugosidade cerca de 20% menores que o CGI A.
7. Um maior avanço resulta em maior oscilação da temperatura nas proximidades da zona de corte.
8. As temperaturas das regiões adjacentes a zona de corte foram mais sensíveis a mudança de material que da velocidade de corte.

5. BIBLIOGRAFIA

- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011. p. ISBN 0470501979.
- DA SILVA, L. R. R.; FILHO, A. F.; COSTA, E. S.; MARCUCCI PICO, D. F.; SALES, W. F.; GUESSER, W. L.; MACHADO, A. R. Cutting Temperatures in End Milling of Compacted Graphite Irons. *Procedia Manufacturing*, v. 26, p. 474-484, 2018/01/01/ 2018. ISSN 2351-9789.
- DA SILVA, L. R. R.; OKADA, K. F. Á.; DE CARVALHO, G. M.; COSTA, E. S.; MACHADO, Á. R. COBEM-2017-5609 VALIDATION OF A POWER MEASUREMENT SYSTEM IN THE MILLING PROCESS USING HALL SENSORS. 2017.
- DA SILVA, L. R. R.; RUZZI, R. S.; TELES, V. C.; SALES, W. F.; GUESSER, W. L.; MACHADO, A. R. Analysis of the coefficient of friction at the workpiece-tool interface in milling of high strength compacted graphite cast irons. *Wear*, 2019.
- FLIR. Use low-cost materials to increase target emissivity. 2015.
- HEIGEL, J. C.; WHITENTON, E.; LANE, B.; DONMEZ, M. A.; MADHAVAN, V.; MOSCOSO-KINGSLEY, W. Infrared measurement of the temperature at the tool-chip interface while machining Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 243, p. 123-130, 2017. ISSN 0924-0136.
- KUS, A.; ISIK, Y.; CAKIR, M. C.; COŞKUN, S.; ÖZDEMİR, K. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors*, v. 15, n. 1, p. 1274-1291, 2015.
- LAURO, C.; BRANDÃO, L.; RIBEIRO FILHO, S. L. Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera. 2013. 1112-1120 p.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo, SP: 2015b. p.
- SIMEONE, A.; WOOLLEY, E.; LUO, Y.; WILLIAMS, O.; RAHIMIFARD, S. Infrared monitoring of aluminium milling processes for reduction of environmental impacts. 2017. ISSN 2319-183X.
- SOUTO, U. B.; SALES, W. F.; SANTOS, S. C.; PALMA, E. S.; GUESSER, W.; BAUMER, I. Torneamento de discos de freio: Avaliação da topografia da superfície e do fenômeno Open Grain. 2002. SAE Congress, São Paulo.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. Elsevier Science, 2013. p. ISBN 9781483165530.
- ZGÓRNIK, P.; GRDULSKA, A. Investigation of temperature distribution during milling process of AZ91HP magnesium alloys. *Mechanics and Mechanical Engineering*, v. 16, n. 1, p. 33-40, 2012. ISSN 1428-1511.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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