



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

TAXA DE MATERIAL REMOVIDO E POTÊNCIA DE CORTE EM PROCESSO DE USINAGEM COM FERRAMENTA ROTATIVA

Letícia Gomes, gomes.leticia1@aluno.ifsp.edu.br¹

Gabriel de Moraes Cordeiro, cordeiro.gabriel@aluno.ifsp.edu.br¹

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br²

Marcel Henrique Militão Dib, marceldib@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250, Jd. Paulo Freire, Araraquara, SP

²Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos, SP

Resumo. Este estudo visa contribuir para o campo da usinagem com ferramentas rotativas por meio de uma análise experimental aplicada em escala micro (microfresamento). Investigamos a relação entre a taxa de material removido e a potência de corte, utilizando testes de microfresamento em uma liga de grãos ultrafinos (RSA 6061). Nossos resultados destacam a importância de considerar dois estágios distintos na determinação da taxa de material removido durante o fresamento: o primeiro, quando múltiplos dentes da fresa estão engajados na zona de usinagem; o segundo, quando há movimento em vazio entre as passadas. Esta abordagem permite determinar de forma eficaz a taxa efetiva de material removido e a potência de corte consumida. Destaca-se que a metodologia desenvolvida neste estudo é aplicável tanto à microfresamento quanto à usinagem convencional, ampliando seu potencial de aplicação e relevância na indústria de usinagem.

Palavras-chave: Microfresamento. Taxa de Material Removido. Força de corte. Potência de corte.

Abstract. This study aims to contribute to the field of machining with rotary tools through an experimental analysis at the micro level (micro-milling). We investigated the relationship between material removal rate and cutting power, using micro-milling tests on an ultra-fine-grained alloy (RSA 6061). Our results show the importance of considering two different stages when determining the material removal rate during milling: the first when several teeth of the milling cutter are engaged in the machining zone and the second when idle motion occurs between passes. This approach makes it possible to effectively determine the actual material removal rate and the cutting power consumed. It is worth noting that the methodology developed in this study is applicable to both micromilling and conventional milling, which expands its potential application and relevance in the machining industry.

Keywords: Micromilling. Removed Material Rate. Cutting force. Cutting Power.

1. INTRODUÇÃO

O fresamento é uma operação de usinagem em que a remoção de material ocorre por meio do movimento rotativo de uma ferramenta multicortante, conhecida como fresa. A fresa possui arestas cortantes simetricamente dispostas ao redor de um eixo, e o movimento rotativo da ferramenta, combinado com o movimento de avanço da peça, gera a forma desejada na superfície da peça. Este processo permite a usinagem de diversas superfícies e formas (Metals Handbook, 1989; Ferraresi, Ruffino e Pallerosi, 1974). O fresamento é um processo versátil de remoção de material que permite a usinagem de superfícies complexas e formas variadas, sendo essencial em diversos setores industriais.

Existem diferentes tipos de fresamento, como o tangencial e o frontal, que podem ser concordantes ou discordantes. No fresamento tangencial a usinagem ocorre principalmente na superfície cilíndrica da ferramenta, enquanto no fresamento frontal a usinagem é realizada na superfície frontal da ferramenta (Diniz, Marcondes e Coppini, 2001). O fresamento pode ser classificado também como fresamento em cheio, fresamento parcial e fresamento de face, dependendo da espessura de corte e do avanço da ferramenta.

É importante destacar que a espessura de corte varia de acordo com o tipo de fresamento e pode ser influenciada pelo sentido do movimento de avanço da peça em relação ao movimento de rotação da fresa. No fresamento discordante, a espessura de corte aumenta gradualmente até um valor máximo, enquanto no fresamento concordante a espessura de corte diminui até um valor mínimo.

As componentes da força de usinagem em fresamento variam a todo momento devido à dinâmica do processo, e mudanças contínuas entre o fluxo lateral de material (ploughing) e o cisalhamento do material ocorrem durante o processo (Dhanorker, Liu e Özel, 2007). Para uma boa qualidade de usinagem, a componente na direção da velocidade de corte (força de corte) é um dos fatores mais importantes a ser analisado. Para que a taxa de produção seja mais elevada e a ferramenta de corte suporte tal esforço, o conhecimento desta força em processos rotativos deve ser aumentado (Huang

et al., 2010). Da força de corte chega-se à energia de corte, que é o trabalho realizado pela ferramenta na direção instantânea de corte. A derivada desta energia no tempo corresponde a potência de corte consumida em um dado instante do processo de usinagem, o domínio e o controle desta grandeza conduzem uma série de vantagens como por exemplo o controle do calor produzido na superfície da peça e da ferramenta de corte, do esforço excessivo da máquina ferramenta ou da ferramenta e do consumo de energia da operação. A potência de corte, por meio da força de corte, pode ser determinada de dois modos: o primeiro pode ser em função da força de corte e da velocidade de corte; e o segundo em função da pressão específica de corte e da taxa de material removido. O método da pressão específica e da taxa de material removido é, geralmente, o mais usado em operações de fresamento.

O objetivo deste trabalho é analisar experimentalmente as diferentes formas de determinar a potência de corte no processo de fresamento, com foco no microfresamento de ligas de grãos ultrafinos. Através de testes controlados de usinagem com ferramentas rotativas, buscamos compreender como as variáveis de corte influenciam a eficiência e a precisão dessas determinações. Esta investigação visa fornecer detalhes que contribuam para um maior entendimento das condições de operação e sua influência na verdadeira potência de corte, aprimorando a precisão em fresamento para aplicações industriais.

2. METODOLOGIA

2.1. Espessura de corte

Devido a combinação entre o avanço da mesa fresadora e o movimento rotativo da ferramenta de corte, a espessura de corte é instantaneamente variável. Assim, gerando uma estrutura em forma de vírgula por onde o dente da fresa passou e removeu material, conforme demonstra a Fig 1.

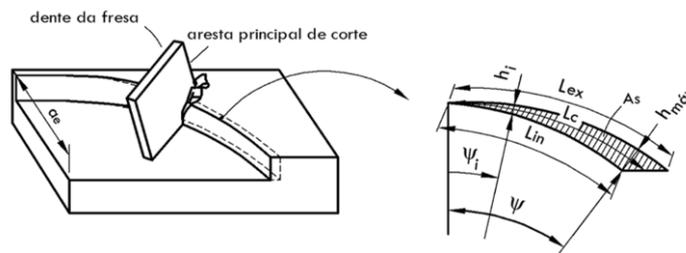


Figura 1. Fresamento frontal parcial: movimento de corte. Modificado de Metals Handbook (1989)

Onde, a_e é a penetração de trabalho e f_z é o avanço por dente. Pode-se observar na Fig 1 a variação da espessura de corte (h_i) e a profundidade de usinagem (a_p). A área superficial (A_s) é considerada a zona de usinagem. Devido aos movimentos subsequentes da ferramenta de corte, a superfície do cavaco indeformado é composta por um comprimento de corte externo (L_{ex}) gerado no momento do corte e por um comprimento de corte interno (L_{in}) gerado por um corte anterior. Contudo os dois comprimentos estão atuando ativamente na ferramenta, assim, pode-se considerar como comprimento de corte (L_c) o valor médio entre o L_{ex} e L_{in} . O ângulo de abertura (Ψ), da zona de usinagem, é chamado de ângulo de contato, este é determinado do ponto de intersecção entre os cortes subsequentes até a espessura de corte máxima (h_{max}); e o ângulo de contato instantâneo Ψ_i representa a variação de Ψ .

Para a variação da espessura de corte, de acordo com Ferraresi, Ruffino e Pallerosi (1974) a seguinte equação pode ser usada:

$$h_i = f_z \cdot \sin \psi_i \cdot \text{sen} \chi_r \quad (1)$$

Pelo fato da espessura de corte ser instantaneamente variável, Diniz, Marcondes e Coppini (2009) propuseram representar a espessura de corte no processo de fresamento como sendo a média da variação de tal espessura instantânea como mostra a Eq. (2), dita como espessura de corte média. Para se chegar a tal espessura estes autores aplicaram o teorema do valor médio. Este teorema busca encontrar o valor médio da variação de uma função, em que o resultado é o quociente entre a integral da função e seu intervalo.

$$\bar{h} = \frac{1}{\psi - 0} \int_0^{\psi} f_z \cdot \sin \psi_i \cdot d\psi = \frac{f_z(1 - \cos \psi)}{\psi} = \frac{f_z \cdot a_e}{\psi \cdot R} ; \quad \cos \psi = 1 - \frac{a_e}{R} ; \quad \psi: \text{radianos} \quad (2)$$

Determinado a espessura de corte média do cavaco indeformado, torna-se possível estimar o volume (V_L) pelo produto da espessura de corte média, profundidade de usinagem e o comprimento de corte. Assim, para $\chi_r = 90^\circ$:

$$V_L = \bar{h} \cdot a_p \cdot (L_c) = \bar{h} \cdot a_p \cdot (R \cdot \psi) = f_z \cdot a_e \cdot a_p \quad ; \quad \psi: \text{radianos} \quad (3)$$

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2009); Stemmer (2007) e Fischer et al. (2008), a taxa de material removido (Q) no fresamento é o quociente entre o volume de material removido para um determinado percurso da ferramenta na direção de avanço e o tempo deste percurso. De acordo com estes autores, o volume de material removido é calculado conforme a estrutura de um paralelepípedo retângulo, produto entre a penetração de trabalho, a profundidade de usinagem e o deslocamento total na direção de avanço, conforme demonstra a Fig 2.

A taxa de material removido pode ser determinada pelo quociente entre o volume de material removido e o tempo de avanço conforme a Equação (4). A relação entre o comprimento de avanço e o tempo de avanço é conhecido como velocidade de avanço (Vf).

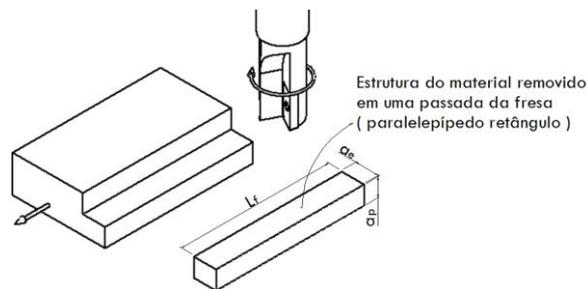


Figura 2. Fresamento com ângulo de posição igual a 90°.

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot L_f}{t_f} = a_p \cdot a_e \cdot V_f \quad (4)$$

Fresamentos não engajados resultam em um tempo para que o dente da fresa entre na zona de usinagem depois que outro sai. Uma vez que a ferramenta não remove material em um certo tempo, este tempo deve ser desconsiderado para o cálculo efetivo da taxa de material removido. A Figura 3 simula o movimento de uma volta da ferramenta em que o fresamento não é engajado, e há tempo de movimento em vazio (tempo passivo). O tempo de corte é o tempo que o dente da fresa leva para passar pela zona de usinagem removendo material, e o tempo passivo é o tempo que o dente da fresa leva para completar o movimento até que o outro dente da fresa entre na zona de usinagem para remover outra camada de material:

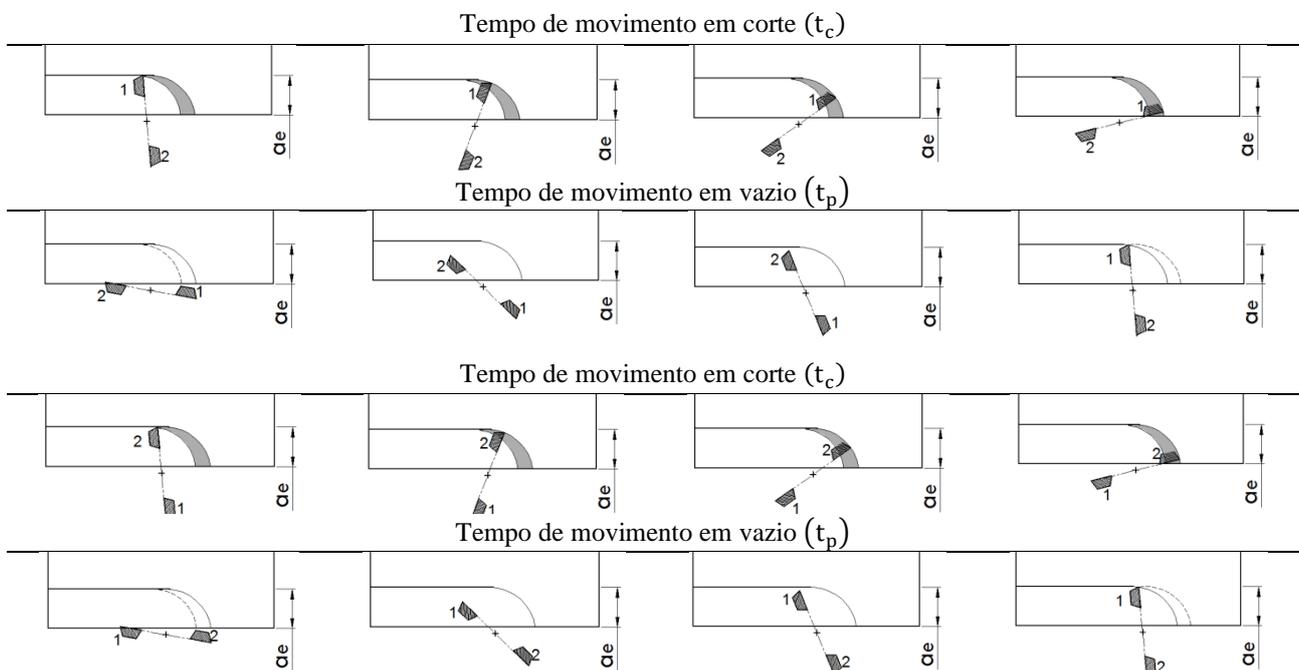


Figura 3. Fresamento parcial discordante: Tempo em corte (tc) e tempo passivo (tp).

Considerando o método convencional para o cálculo da taxa de material removido, para uma volta da ferramenta conforme a simulação da Fig. 3, temos que Q é o quociente do volume de material removido em uma volta (dois cavacos produzidos: $2V_L$) e o tempo corrido desta volta ($t_f = 2t_c + 2t_p$), desta forma tem-se:

$$Q = \frac{2V_L}{t_f} = \frac{2V_L}{2t_c + 2t_p} = \frac{V_L}{t_c + t_p} \quad (5)$$

Pode-se ver na Equação (5) que o tempo durante o qual não houve remoção de material está mascarando os resultados, fazendo com que Q tenha um valor menor que o efetivo. Portanto, se o corte possui movimento em vazio, o tempo corrido não pode ser usado nos cálculos da taxa de material removido. Desta forma, para se calcular a taxa efetiva de material removido em um fresamento não engajado, o tempo passivo precisa ser tirado da equação como mostra a Eq. (6). Sabendo que o volume do cavaco indeformado é $\bar{h} \cdot a_p \cdot L_c$, e que o quociente entre o comprimento de corte e o tempo de corte é a velocidade de corte, têm-se que:

$$Q_e = \frac{V_L}{t_c} = \frac{\bar{h} \cdot a_p \cdot L_c}{t_c} = \bar{h} \cdot a_p \cdot V_c \quad (6)$$

Para que se saiba se o corte é engajado ou não o Quadro 1 fornece, de acordo com os números de dentes (Z) de uma fresa e seu raio (R), a mínima penetração de trabalho para evitar tempo de movimento em vazio, ou seja, a mínima penetração de trabalho a_e para se ter um corte engajado.

Quadro 1. Mínima penetração de trabalho ($a_{e_{\min}}$) para o corte engajado

z	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...
$a_{e_{\min}}$	2R	1,5R	R	0,7R	0,5R	0,38R	0,3R	0,24R	0,2R	0,16R	0,14R	...

2.2. Força e Potência de Corte

Segundo a norma DIN 6584 (1982), as três componentes básicas, perpendiculares entre si, que somadas fornecem a força de usinagem são: a força de avanço, força de corte e a força efetiva, conforme apresenta a Fig 4. Essas forças estão no sentido oposto, respectivamente, da velocidade de avanço (V_f), velocidade de corte (V_c) e velocidade efetiva (V_e). A velocidade efetiva possui uma defasagem angular da velocidade de corte. Consequentemente, a força efetiva possui a mesma defasagem da força de corte. O ângulo entre a velocidade de corte e de avanço é dado por (φ), a diferença angular entre a força de usinagem e a força efetiva é dado por (δ), e a diferença angular entre a força de usinagem e a força de corte é dado por τ . Assim sendo, o produto das componentes das forças de usinagem produz a potência de avanço (P_f), a potência de corte (P_c) e a potência efetiva (P_e).

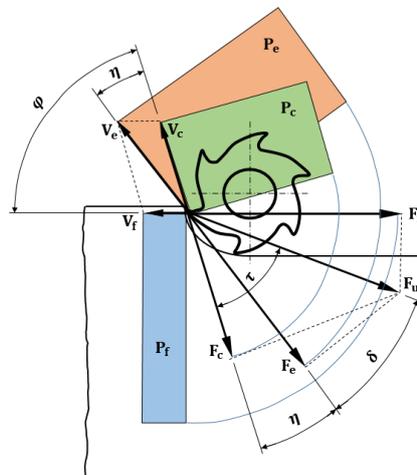


Figura 4: Forças de usinagem em fresamento frontal parcial discordante de acordo com a DIN 6584 (1982).

Em fresamento, as forças de usinagem variam de um valor mínimo até um valor máximo ou vice-versa. Este fenômeno é decorrente da variação da espessura de corte que, também, varia de um valor mínimo até o máximo ou contrário,

conforme o ângulo de contato (ψ). Assim, para determinar a potência de corte consumida na formação de um cavaco em fresamento pode-se usar a força de corte média. A potência de corte pode ser calculada de duas formas: em relação a força de corte F_c e pressão específica de corte k_s . Assim, a potência de corte no fresamento pode ser estimada pelo produto da força de corte média e a velocidade de corte (Eq. 7); o produto entre a pressão específica de corte e a taxa de material removido convencional; e o produto entre a pressão específica de corte e a taxa de material removido efetiva.

$$P_c = \overline{F_c} \cdot V_c = \overline{k_s} \cdot Q = \overline{k_s} \cdot Q_e \quad (7)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta os resultados das componentes da força de usinagem em um fresamento frontal parcial do início da operação ao final. Pode-se observar por meio da Fig. 5 que após a espessura máxima, $h_{m\acute{a}x}$, (ponto A) que é o momento em que o segundo dente da fresa sai da zona de usinagem, transcorre um tempo de decaimento do dinamômetro e ao mesmo tempo o movimento em vazio da ferramenta, pois neste intervalo não há remoção de material. Após este intervalo (do ponto A ao ponto B), o primeiro dente da fresa retorna a zona de usinagem (ponto B). Quando o primeiro dente entra em contato com a peça, as forças começam a aumentar progressivamente conforme o aumento da espessura de corte. Desta forma, a distância entre o ponto B e C compreende o tempo durante o qual ocorreu a formação de cavaco. Quando o primeiro dente da fresa chega à espessura de corte máxima (ponto C), o cavaco é expelido da peça pelo movimento rotativo da ferramenta de corte e, neste exato momento, não há mais remoção de material. Portanto, as forças, novamente, começam a decair (do ponto C até o ponto D). Após o movimento em vazio inicia-se um novo ciclo de fresamento, compreendido do ponto D ao ponto E, pelo segundo dente da fresa. Desta forma os ciclos se repetem sucessivamente até o final da operação de fresamento.

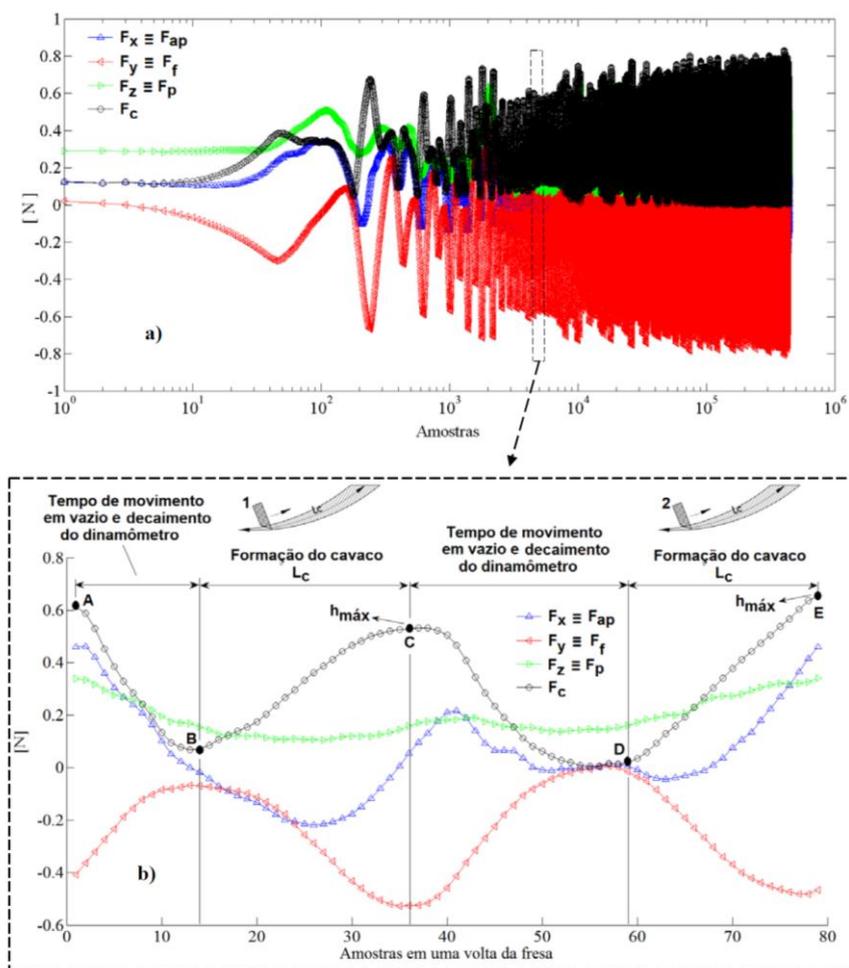


Figura 5. Componentes da força de usinagem em microfresamento frontal parcial: $V_c = 50$ m/min, $f_z = 5$ μ m/dente, $a_e = 0,4$ mm, $a_p = 50$ μ m, $R = 0,4$ mm, $\psi = 60^\circ$ e $Z = 2$. a) sinal completo de toda usinagem realizada. b) sinal de uma volta da fresa em que há formação de 2 cavacos. Modificado de Militão Dib et al. (2018).

Movendo o sinal das forças de todos os ciclos para uma origem, foi possível obter uma linha média da força de corte. Para cada condição foi encontrada uma linha média e com base nesta linha foram realizados os cálculos da Potência de corte em função da força de corte e da velocidade de corte, da pressão específica de corte e da taxa de material removida convencional e efetiva. Uma análise das diversas representações da potência de corte é demonstrada pela Fig. 6 que retrata a potência de corte sendo consumida na formação de um cavaco ($P_{c\text{real}}$: linha contínua espessa), a qual aumenta com o acréscimo da espessura de corte, devido ao maior esforço da ferramenta de corte para remover uma maior quantidade de material. A potência de corte real, foi determinada pelo produto da força de corte medida pelo dinamômetro piezoelétrico e a velocidade de corte. O método de cálculo que mais se aproximou da variação desta potência de corte foi o que tomou como base a força de corte média ($P_{c_i} = \bar{F}_c \cdot V_c$). Por outro lado, calculando a potência pela taxa de material removido convencional e efetiva ($P_{c_i} = \bar{k}_s \cdot Q$ e $P_{c_i} = k_{s_i} \cdot Q_e$), os valores mostraram uma pequena diferença. A potência estimada pelas constante k_{s1} e pelo coeficiente angular da reta m , apresentou uma significativa diferença dos valores reais:

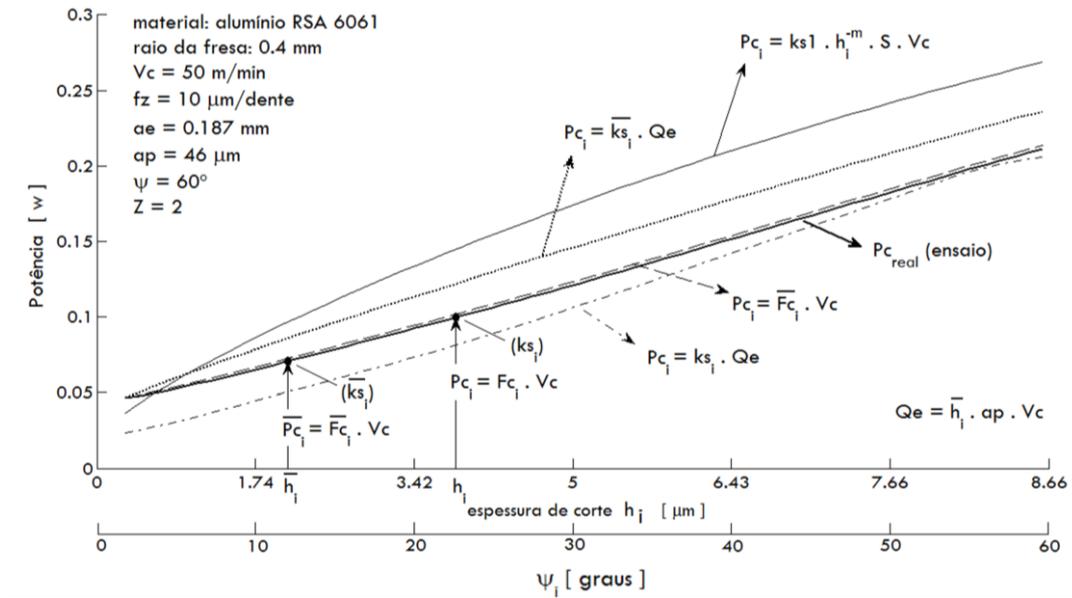


Figura 6. Potência de corte na formação de um cavaco em microfresamento parcial. Modificado de Militão Dib (2013).

Por fim, a Fig. 7 apresenta uma comparação entre a potência de corte calculada em função da taxa de material removido convencional ($Q = a_e \cdot a_p \cdot V_f$), em função da taxa efetiva de material removido ($Q_e = \bar{h} \cdot a_p \cdot V_c$) e a real potência de corte consumida para microfresamentos com movimentos em vazio. Pode-se observar, na Fig. (10), que a potência calculada em função da taxa de material removido convencional, $P_c(Q)$, apresentou valores menores que a potência de corte real $P_c(F_c)$. Este efeito deve-se ao intervalo de tempo que não houve usinagem, uma vez que tal tempo é considerado no cálculo da taxa de material removido convencional, os valores da potência de corte tendem a ser menores, pois Q é uma relação entre o volume e o tempo corrido.

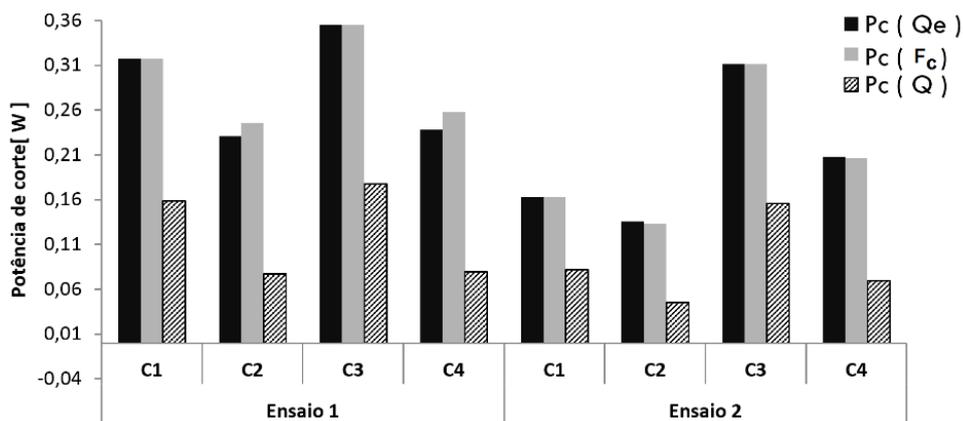


Figura 7. Comparação entre a Potência de Corte Real $P_c(F_c)$, Potência de Corte em função da taxa de material removido convencional $P_c(Q)$ e da taxa de material removida efetiva $P_c(Q_e)$.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, investigamos a real potência de corte no processo de microfresamento através da medição das forças de usinagem com um dinamômetro piezoelétrico. Realizamos experimentos de microfresamento parcial para esclarecer e determinar corretamente a potência de corte, considerando a variação dos parâmetros de corte. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada das diferentes formas de calcular a potência de corte, contribuindo para um maior entendimento das condições de operação e sua influência na precisão do processo de fresamento. As principais conclusões deste estudo são:

- Os parâmetros das condições de usinagem usada nos métodos experimentais e aplicados no material RSA6061-T6, a força de corte variou de 180 mN a 400 mN para ambas as ferramentas de corte. A força de corte para estes experimentos pode ser estimada pelas constantes $k_{s1} = 364 \text{ N/mm}^2$ e $z = 0,27$.
- A potência de corte variou de 60 mW a 360 mW. Com base nestes resultados conclui-se que quando o fresamento for engajado (mais que um dente da fresa está atuando na zona de usinagem) a taxa de material removido convencional pode ser usada nos cálculos da potência de corte; e quando o corte não é engajado, neste caso a taxa de material removido efetiva deve ser utilizada para os cálculos da potência de corte.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Metals. Metals handbook. 9th ed. ASM Handbook, 1989. 17v.
- Diniz, A.E.; Marcondes, F.C.; Coppini, N. L., 2009, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, 7. ed. São Paulo: Artliber.
- DIN 6584: Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen. (Beuth, Berlin 1982)
- Dhanorker, A.; Liu, X.; Özel, T., 2007, “Micromilling process planning and modeling for micromold manufacturing”, In: Asme International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2007, Atlanta. Proceedings... [S.l.:s.n.]. pp.759-769.
- Ferraresi, D.; Ruffino, R. T; Pallerosi, C. A., 1974, “Usinagem dos metais: processo de fresamento”, 3 ed. São Paulo: ABM.
- Fischer, U. et al., 2008, “Manual de tecnologia metal mecânica”, São Paulo: Edgard Blucher.
- Hong, Y.-C.; Ha, S.- J.; Cho, M.-W., 2012, “Predicting of cutting forces in a micromilling process based on frequency analysis of sensor signals and modified polynomial neural network algorithm”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, n. 1, pp. 17-23.
- Jasinevicius, R. G. et al., 2004, “Ferramentas monocortantes de diamante monocristalino”, In: PORTO, A. J. V. et al. Usinagem de ultraprecisão, São Carlos: RiMA; FAPESP, Cap. 3, pp. 25-43.
- Militão Dib, M.H.; Duduch J.G.; Jasinevicius, R.G., 2018, “Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling”, Precision Engineering, Vol 51, pp 244–262.
- Militão Dib, M.H., 2013, “Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Stemmer, C. E., 2007, “Ferramentas de corte I”, 7th ed. Florianópolis: Ed.UFSC.
- Taniguchi, N., 1983, “Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 32, pp. 573-582.
- Weule, H.; Hüntrup, V.; Tritschler, H., 2001, “Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 50, pp. 61-64.
- Yun, H. T., S. Heo, M. K. Lee, B. K. Min, and S. J. Lee, 2011, “Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 51, pp. 377-382.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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