

ANÁLISE DAS FORÇAS DE USINAGEM DURANTE A FORMAÇÃO DO CAVACO EM MICROFRESAMENTO

Marcel Henrique Militão Dib, marceldib@ifsp.edu.br^{1,2}

Dhiego de Godoi Dias, Dhiego.dias@usp.br¹

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br¹

¹Depto Eng. Mecânica, EESC, USP, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil

²Inst. Federal de Educ. Ciência e Tecnologia de São Paulo, CEP14801-600 Araraquara –SP, Brasil

Resumo: As forças de usinagem são grandezas intrínsecas nos processos mecânico de remoção de material. Em processos de fresamento, essas forças variam a todo instante, devido à dinâmica desse tipo de operação. Os sensores de forças (dinamômetros) registram as três componentes nas direções x , y e z , perpendiculares entre si, e, por meio dessas, outras componentes podem ser determinadas, como é o caso da força de corte (F_c), força de compressão (F_t) e da força ativa (F_a). Determinar as forças F_c e F_t no processo de fresamento tem sido um desafio e muitos trabalhos têm assumido que a força de corte pode ser representada pela força ativa. Essa estratégia é adotada porque a força ativa é a soma vetorial das componentes na direção x e y fornecidas pelo dinamômetro, enquanto que a força de corte é a soma das decomposições das forças F_x e F_y na direção de corte, e isto torna sua determinação complexa em fresamento devido ao movimento aproximadamente circular que a ferramenta realiza. Para solucionar essa questão, foi criado um programa de computador (ForUpDown) na linguagem MatLab capaz de caracterizar a força de corte durante a formação do cavaco. O sinal das componentes na direção x , y e z , fornecidas pelo dinamômetro, são reconhecidas pelo programa e tratadas de modo a fornecer a F_c , F_t e F_a . Os resultados de forças dos experimentos de microfresamento realizados no material RSA6061 demonstraram que existe uma diferença significativa entre a Força Ativa e a Força de Corte. Também foi observado que existe um comportamento distinto entre a atuação da força de corte e da força de compressão durante o movimento discordante e concordante da ferramenta. Concluímos que durante o movimento discordante maiores intensidades de forças estão atuando sobre a superfície de saída da ferramenta, enquanto que no movimento concordante maiores intensidades de forças estão atuando na superfície de folga da ferramenta. Levantando assim a hipótese que no movimento discordante pode ocorrer um maior desgaste de cratera e no movimento concordante pode ocorrer um maior desgaste de flanco.

Palavras-chave: Forças de Usinagem, Força de Corte, Força Ativa, Microfresamento, RSA6061.

1. INTRODUÇÃO

Forças de usinagem em processos mecânicos de remoção de material são tão importantes quanto as propriedades mecânicas do material. Por meio das forças de usinagem é possível determinar as energias consumidas no processo que caracterizam a resistência do material ao corte assim como a tensão de tração e a dureza caracterizam a força e a resistência à deformação plástica do material (Shaw, 2005).

Essas forças de usinagem podem descrever a facilidade ou a dificuldade em se usinar uma peça. Por exemplo, pode-se avaliar, por meio delas, um dado ângulo de saída ótimo da ferramenta. As forças geradas com ângulos de saída negativos são mais altas do que aquelas geradas nos processos com ângulos de saída positivos (Sekmen, et al. 2005). Uma usinagem mais fácil é alcançada com forças baixas, pois proporcionam menor desgaste da ferramenta, menor esforço da máquina ferramenta e menor aquecimento na zona de usinagem, além de poder prever todos esses parâmetros mencionados (Palanisamy, et al. 2006).

Conforme a Norma DIN 6584 (1982) e a NBR 12545 (1991) a força de usinagem (F) é a força total gerada durante a usinagem. A projeção dessa força perpendicular ao plano de trabalho, onde se encontra a velocidade de corte e a velocidade de avanço, fornece a força passiva (F_p). A projeção da força de usinagem no plano de trabalho fornece a força ativa (F_a). Neste mesmo plano, a projeção da força ativa na direção da velocidade de corte fornece a força de corte (F_c), e na direção da velocidade de avanço fornece a força de avanço (F_f). As forças perpendiculares a força de corte e a força de avanço são, respectivamente, a forças de compressão (F_t) e de apoio (F_{fN}). A única força que não mantém a nomenclatura da norma DIN 6584 e NBR 12545 aqui é a de compressão, pois esta força é conhecida na literatura como “thrust force”, a força gerada pela compressão da aresta de corte contra a superfície acabada da peça, e, portanto, preferiu-se usar sua nomenclatura mais conhecida que é F_t .

Em processos de microfresamento ou mesmo fresamento convencional, essas forças variam a todo instante devido ao movimento circular e ao mesmo tempo linear que o dente da ferramenta realiza. Circular por causa do giro do eixo árvore da máquina ferramenta, e linear decorrente do avanço da mesa, assim, simultaneamente, provocando um

movimento trocoide (Bao e Tansel, 2000). Dessa forma, a direção da velocidade de corte muda a cada instante de tempo e algumas forças desse processo podem sofrer uma mudança de sentido em determinados instantes de tempo.

Em face a essa especificidade do microfresamento ou fresamento convencional, determinar a força de corte durante a formação do cavaco a partir do sinal fornecido pelo dinamômetro tem sido um desafio, e muitos trabalhos têm assumido que a força de corte pode ser representada pela força ativa. Essa estratégia é adotada porque a força ativa é a soma vetorial das componentes F_{fN} e F_f , enquanto que a força de corte é a soma das decomposições dessas forças na direção de corte, e isto torna sua determinação complexa devido a dinâmica do processo.

De modo a contribuir à determinação e caracterização da força de corte e da força de compressão durante a formação do cavaco em processos de microfresamento ou fresamento convencional, este trabalho apresenta um programa de computador criado na linguagem MatLab capaz de realizar essa tarefa. Para verificar sua funcionalidade, foram realizados experimentos de microfresamento em uma liga de alumínio de grãos ultrafinos (RSA6061).

2. FORÇAS DE USINAGEM EM FRESAMENTO

As forças de usinagem só começam a ser geradas no momento em que a ferramenta toca a peça. As forças do sistema, aquelas que aproximam a ferramenta a peça, não são consideradas como forças de usinagem. Assim sendo, durante a usinagem, sem considerar as forças do sistema, as principais variáveis do fresamento obtidas no plano de trabalho, conforme mostra a figura abaixo, são: potência de corte (dada pelo produto entre a força de corte e velocidade de corte), potência de avanço (dada pelo produto entre a força de avanço e velocidade de avanço) e a potência efetiva de corte (dada pelo produto entre a força efetiva e velocidade efetiva de corte).

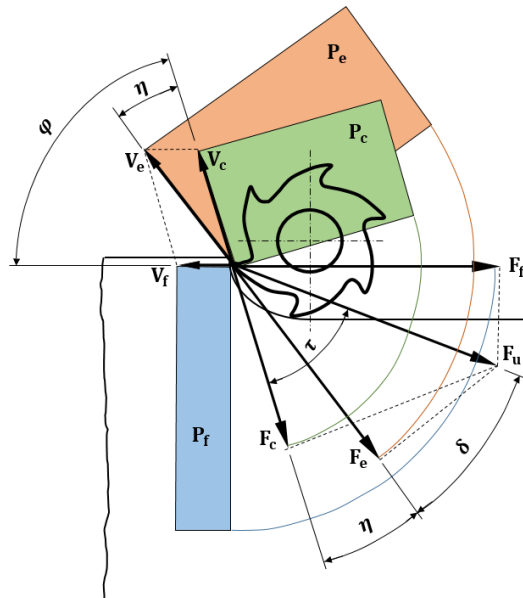


Figura 1. Potência de corte P_c , potência de avanço P_f e potência efetiva de corte P_e em fresamento (DIN 6584, 1982 e NBR 12545, 1991).

As forças de usinagem em processo de microfresamento ou fresamento convencional variam de um valor mínimo até um valor máximo e/ou de máximo até um valor mínimo. Isto é decorrente da variação da espessura de corte (h_i) que varia da mesma forma conforme a variação angular da ferramenta (ângulo de contato ψ_i).

A dinamometria em processos de usinagem normalmente fornece as três componentes nas direções x, y e z, perpendiculares entre si, e no caso do fresamento de topo essas direções correspondem as forças F_{fN_i} , F_{f_i} e F_{p_i} . Assim, a força de usinagem (F_i), força ativa (F_{a_i}), força de corte (F_{c_i}) e força de compressão (F_{t_i}) podem ser determinadas conforme a relação trigonométrica apresentado pela Fig. (2) e expressas por Eq. (1), (2), (3) e (4).:

No processo de microfresamento há uma inversão de sentido das forças F_{fN_i} e F_{f_i} , conforme é demonstrado na Fig. (2) pela transição de ψ_1 para ψ_2 (F_{fN_i}) e de ψ_3 para ψ_4 (F_{f_i}). No início do corte, o raio de aresta (r_e) da ferramenta de corte é maior que a espessura de corte e, assim sendo, a peça é empurrada para o lado esquerdo e para frente (Fig. (2): ψ_1). A partir do momento que a espessura de corte se torna maior que o raio de aresta, a ferramenta deixa de empurrar a peça para o lado esquerdo e começa a puxar a peça para o lado direito, e, por consequência, a F_{fN_i} inverte de sentido (Fig. (2): ψ_2). Até aqui, a força F_{f_i} continua empurrando a peça para frente, porém, quando novamente o raio da aresta é maior que a espessura de corte, a ferramenta deixa de empurrar a peça para frente e começa a puxá-la para trás. Dessa forma, F_{f_i} também inverte de sentido. Portanto, F_{fN_i} irá inverter de sentido no início do fresamento e F_{f_i} no final.

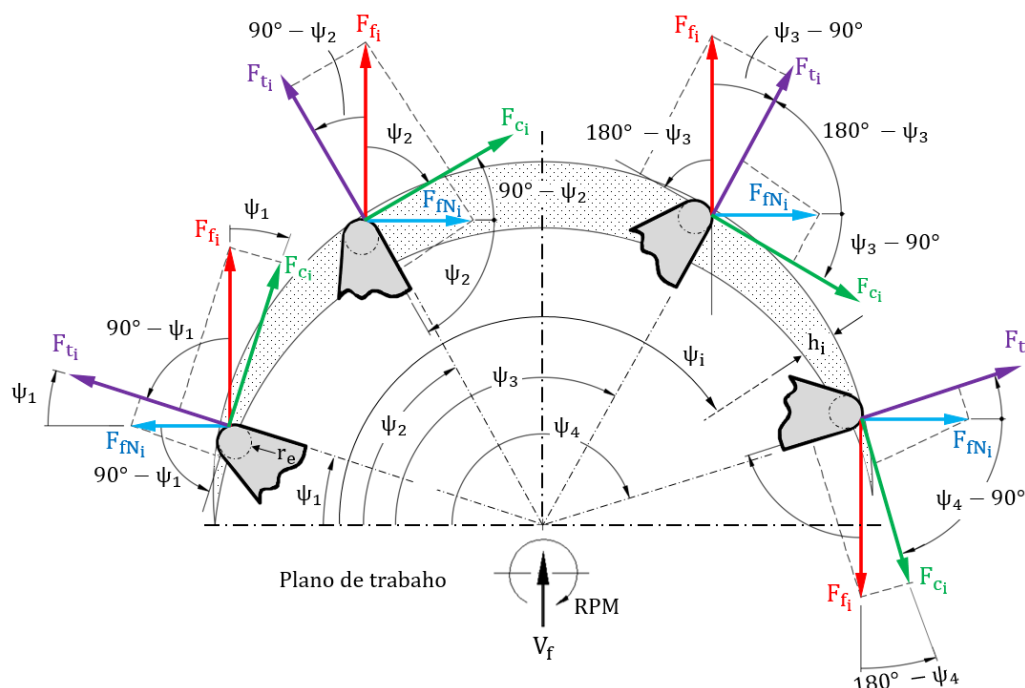


Figura 2. Sentido e direção das forças de usinagem em microfresamento de topo.

$$F_i = (F_{f_i}^2 + F_{f_{N_i}}^2 + F_{p_i}^2)^{1/2} \equiv (F_{c_i}^2 + F_{t_i}^2 + F_{p_i}^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$F_{ai} = (F_{fi}^2 + F_{fi}^2)^{1/2} \equiv (F_{ci}^2 + F_{ti}^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$F_{ci} = F_{fi} \cos \psi_i + F_{ni} \sin \psi_i \quad 0 \leq \psi_i \leq 180 \quad (3)$$

$$F_{t_i} = F_{f_i} \sin \psi_i - F_{fN_i} \cos \psi_i \quad 0 \leq \psi_i \leq 180 \quad (4)$$

Uma das principais aplicações da força de corte (F_{c1}) é determinar a energia específica de corte (u_1). Pode-se interpretar a energia específica de corte como a energia necessária para remover uma unidade de volume do material da peça (Stemmer, 2007). Para se alcançar a energia específica de corte é necessário primeiro determinar a energia consumida durante o movimento (energia de corte: u_{c1}). Segundo Halliday (2014) a energia é o produto apenas da componente da força que atua na direção do movimento e a distância percorrida paralela a esta direção. Uma vez que a direção da força de corte é a mesma da velocidade de corte (Feraresi, 1970) que por sua vez é não-linear em processos de fresamento, um método possível para o cálculo da energia de corte é por meio da variação infinitesimal de um volume de material sendo removido:

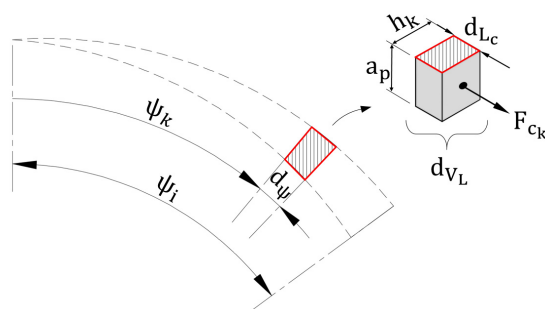


Figura 3. Representação de um volume infinitesimal sendo removido em processo de fresamento.

$$du_{c_k} = F_{c_k} \cdot dL_c = F_{c_k} \cdot R \cdot d\psi \quad d\psi \text{ [rad]} \quad (5)$$

A integral da Eq. (5) fornece a energia de corte despendida do início da formação do cavaco até ψ_i conforme expresso pelo segundo membro da Eq. (6). Contudo, pode-se também resolver a Eq. (5) de forma discreta (solução aproximada) fazendo $d\psi$ finito ($\Delta\psi = \psi_i \cdot N^{-1}$). Assim, a soma das energias de corte de todos os volumes finitos do cavaco também fornecerá a energia de corte despendida até ψ_i , como demonstrado pelo terceiro membro da Eq. (6). Logo, a energia de

corte até ψ_i pode ser determinada, aproximadamente, pelo produto entre a força de corte média até ψ_i e o deslocamento da ferramenta do início da formação do cavaco até ψ_i . O deslocamento da ferramenta durante a formação do cavaco no processo de fresamento é denominado comprimento de contato (L_{ci}) e pode ser determinado pelo produto do raio da fresa e o ângulo de contato (ψ_i) em radianos.

$$u_{ci} = R \int_0^{\psi_i} F_{ck} \cdot d\psi \cong R \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N=i} F_{ck} \cdot \psi_i = \overline{F}_{ci} \cdot L_{ci} \quad [\text{N.m}] \quad (6)$$

Portanto, a energia específica de corte (u_i) pode ser descrita pelo quociente entre a energia de corte e o volume do cavaco removido, o qual por sua vez é determinado pelo produto entre a espessura de corte média até ψ_i , o comprimento de contato até ψ_i e a profundidade de corte (a_p):

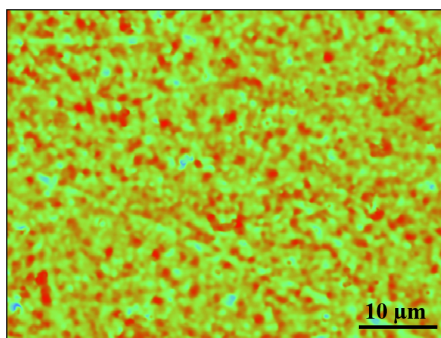
$$u_i = \frac{u_{ci}}{\overline{h}_i \cdot L_{ci} \cdot a_p} = \frac{\overline{F}_{ci}}{\overline{h}_i \cdot a_p} \quad [\text{J/mm}^3] \quad (7)$$

onde,

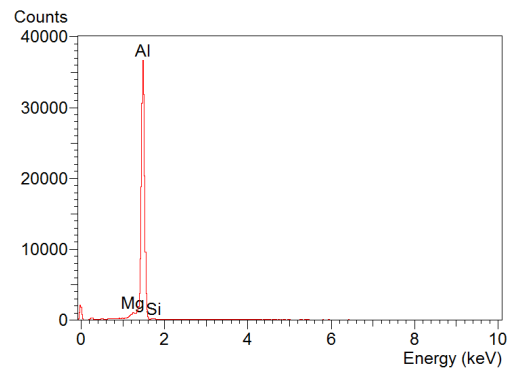
$$\overline{h}_i = \frac{1}{\psi_i} \int_0^{\psi_i} f_z \sin(\psi_k) \cdot d\psi = \frac{f_z}{\psi_i} (1 - \cos \psi_i) \quad \begin{matrix} \psi_i [\text{rad}] \\ \chi_r = 90^\circ \end{matrix} \quad (8)$$

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para realizar os testes de microfresamento e obter as respectivas forças de usinagem, um centro de usinagem vertical CNC (Hermle C800U) foi usado. Esta máquina possui potência de 18 Kw, rotação máxima de 24000 RPM, e um erro de posicionamento de 0,5 μm . A rotação e profundidade de usinagem foram mantidas constantes ($n = 20000$ RPM e $a_p = 50$ μm) e a usinagem foi realizada sem fluido de corte. Ferramentas de metal duro, com dois dentes, diâmetro de 0,8 mm e sem revestimento da marca Swisstool® foram utilizadas. Os avanços por dente (f_z) foram de 5 e 10 μm . O material da peça os testes foi uma liga de alumínio de grãos ultrafinos (tamanho médio de 1 μm) designado pelo fabricante como RSA 6061-T6 com as seguintes propriedades mecânicas: densidade (2,7 g/cm³), dilatação térmica (23 10⁻⁶/K), módulo de elasticidade ($E = 70$ GPa e $G = 26$ GPa), condutividade térmica (160 W/m.K), tensão de escoamento (295 MPa), limite de resistência (330 MPa), alongamento (12%) e dureza (117 HV). A microestrutura e a composição química do material (98,2% Al, 0,3% Si e 0,5%Mg) são mostrados na Fig. (4).



a)



b)

Figura 4. Material da peça (RSA 6061) para os experimentos de microfresamento. a) microestrutura do material – perfilometria óptica. b) composição química do material – espectroscopia por energia dispersiva.

A aquisição dos dados das três componentes ortogonais (x, y e z) da força de usinagem foram coletadas por meio de um dinamômetro piezelétrico da marca Kistler®, modelo 9256C2, faixa de trabalho na direção x, y e z de -250 à 250 N, frequência natural de 4kHz, rigidez de 250 N/ μm ; e por um amplificador de carga de três canais também da marca Kistler® (modelo 5233A), nenhum tipo de filtro foi utilizado no amplificador. A conversão e transmissão dos sinais analógicos para o digital foram realizados por uma placa de aquisição de dados (USB-6216 *board*) da marca National Instruments (frequência máxima de 400 KHz multicanal) e um programa labVIEW® da mesma marca. Para uma discretização contínua das forças de usinagem, foi adotado uma taxa de aquisição de 1 amostra de força coleta a cada 1 grau de giro da ferramenta. Isto equivale a uma frequência de aquisição ajustada em 130 KHz para um eixo em rotação de 20000 RPM.

O sistema de aquisição foi montado então da seguinte maneira: o dinamômetro foi fixado em um gabarito que por sua vez foi fixado à mesa da máquina. O dinamômetro foi conectado ao amplificador de carga, o qual foi conectado à

placa de aquisição. Esta, por sua vez, foi conectada à placa mãe de um notebook que possui o programa labVIEW®. O posicionamento da ferramenta de corte no eixo z foi realizado por um dispositivo de calibração da marca dot-zero® com precisão de 1 µm a uma distancia de 30 mm da superfície de apoio da peça, conforme mostra o esquema da Fig. (4). O tipo de fresamento realizado foi o de corte em cheio (penetração de trabalho correspondente ao diâmetro da microfresa).

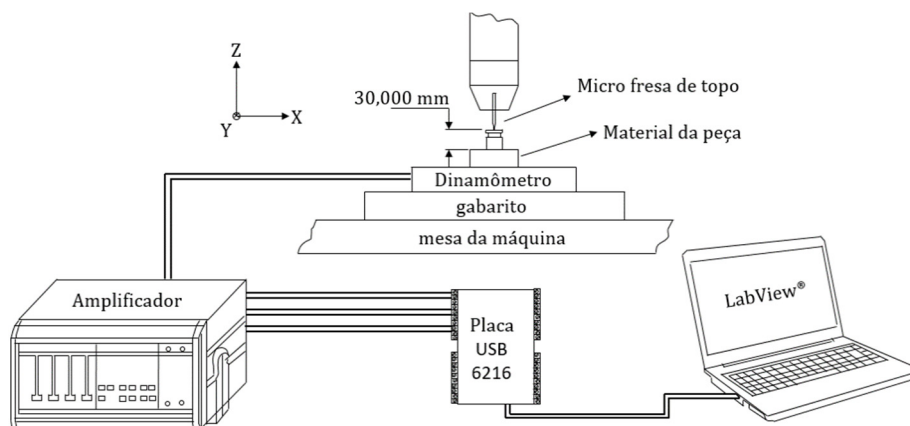


Figura 5. Sistema de aquisição das forças de usinagem.

3.1. Caracterização das forças de usinagem

Após a coleta de dados, as forças de usinagem foram tratadas por meio de um programa (independente) criado na linguagem MATLAB, denominado ForUpDown. Este programa está registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), número de registro BR 51 2016 001604-3 (titular e criador: Marcel Henrique Militão Dib). Este programa é subdividido conforme aplicação: ForMilling para operação de fresamento; ForTurning para operação de torneamento; ForGrinding para operação de Retificação; e etc. A versão ForMilling é capaz de fazer o sinal médio das componentes das forças de usinagem fornecidas pelo dinamômetro durante a formação dos cavacos produzidos pelos dentes da microfresa. Podendo ser usado em microfresamento ou em macrofresamento.

Conforme mostra a Fig. (6), é preciso fornecer os parâmetros de corte e de aquisição. Caso seja preciso, também é possível passar alguns filtros no sinal digital. Esta função só é acionada quando os botões Banda Stop, Passa Banda, Passa Baixa e Passa Alta são clicados. Nos resultados deste artigo, nenhum filtro foi utilizado. Por fim, basta clicar no botão *Start* para iniciar o tratamento do sinal das forças de usinagem conforme as opções selecionadas no quadro Etapas, Direção e sentido de fresamento e Tipo de fresamento.

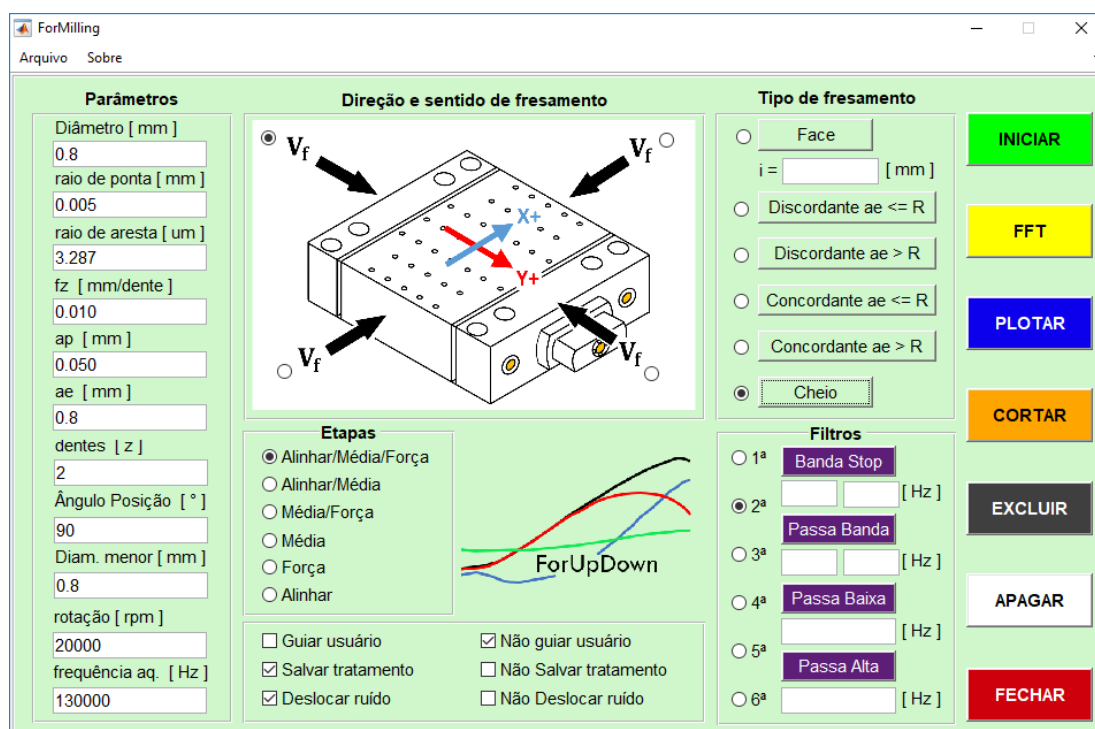


Figura 6. ForUpDown, versão ForMilling: programa para o tratamento das forças de usinagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico das forças de usinagem sem tratamento em microfresamento comporta-se conforme demonstra a Fig.(7)-a. Existe um intervalo de tempo no qual a ferramenta se aproxima da peça e não há remoção de material. Neste intervalo pode ver o ruído do sistema que foi da ordem de 0,2 N. Quando a ferramenta entra em contato com a peça (tempo de usinagem) as forças de usinagem oscilam de máximo a mínimo devido a dinâmico do processo de fresamento, conforme demonstra a Fig. (7)-b. O sistema pode apresentar um erro de inclinação como demonstrado pelo δ na Fig. (7)-a. Para solucionar este problema o algoritmo presente no programa identifica o valor dessa inclinação e faz um alinhamento.

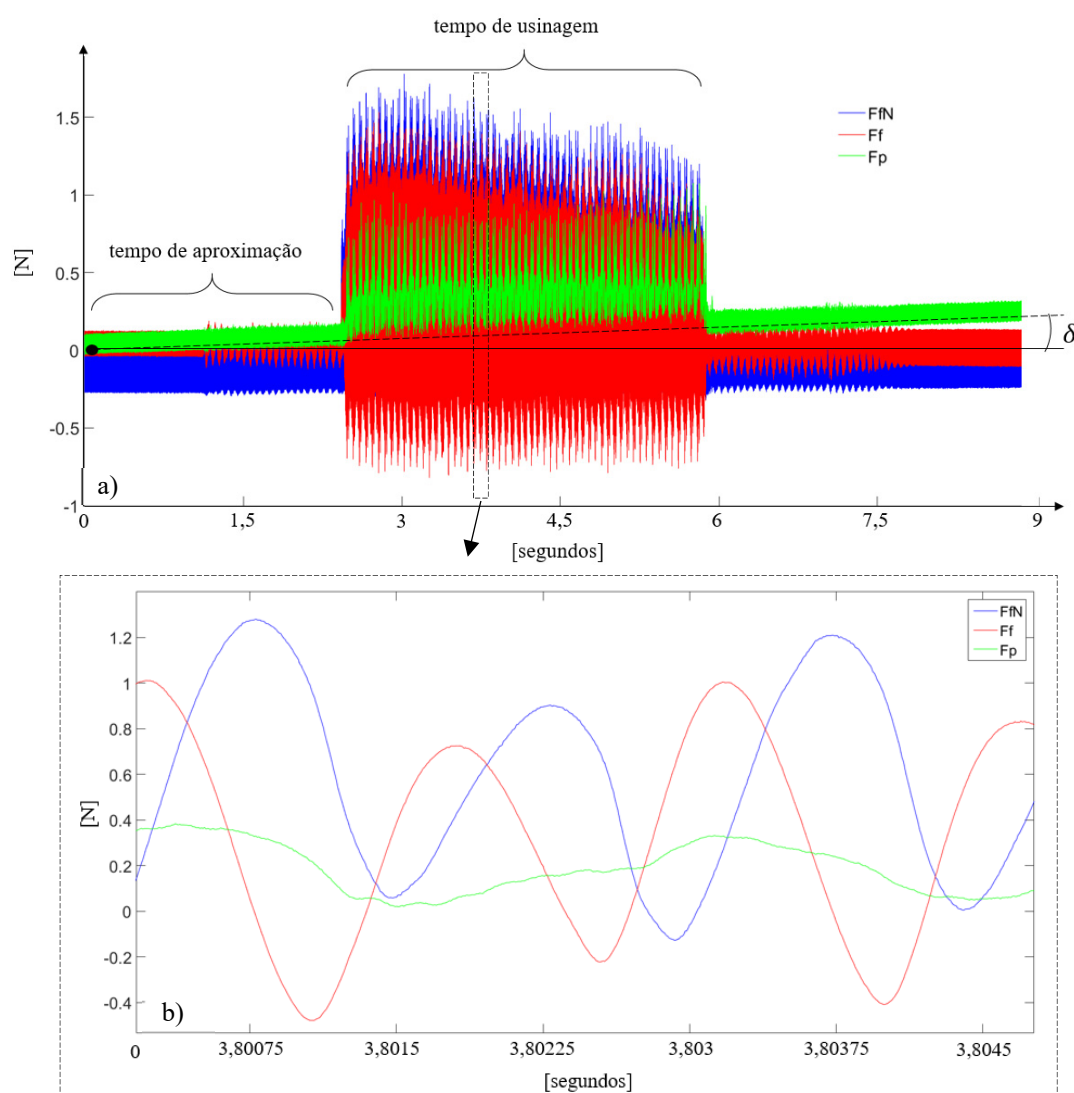


Figura 7. Dados experimentais das forças de usinagem em microfresamento, experimento: fz de 10 μm , ap de 50 μm e raio de aresta de 3,287 μm .

Após o alinhamento do sinal, o programa pede para o usuário realizar dois cliques de forma a estabelecer um intervalo amostral onde somente houve usinagem – Fig. (8)-a. Baseado neste intervalo o algoritmo presente no ForUpDown determina então o período médio dos ciclos de fresamento (uma volta completa da fresa) conforme demonstra a Fig. (8)-b. Sendo a fresa composta por dois dentes, tem-se um gráfico com duas ondulações dentro de um giro completo da ferramenta. As linhas tracejadas próximas as linhas médias desta última figura mencionada correspondem a variabilidade dos valores médios obtidos com uma confiança de 95%.

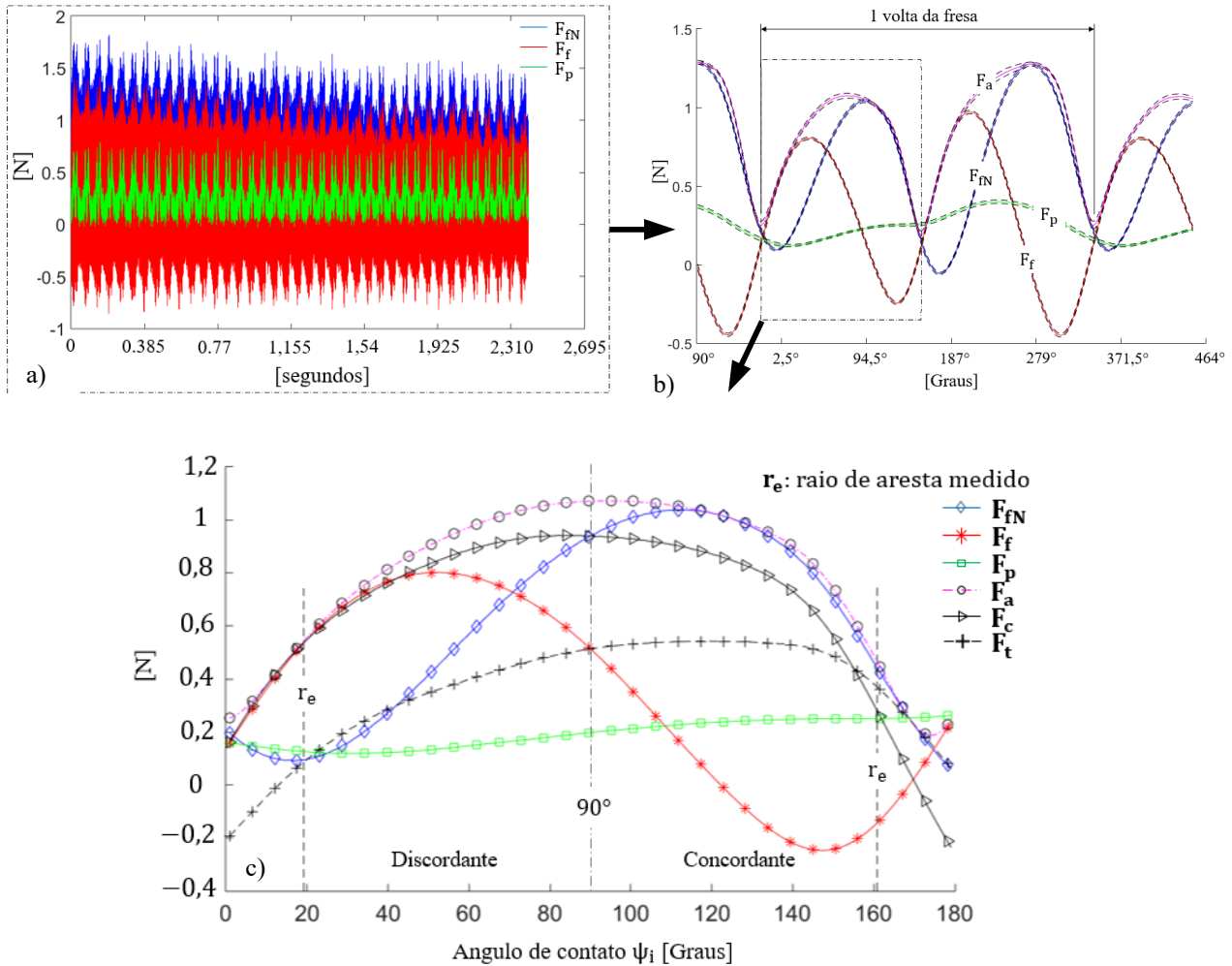


Figure 8. Dados experimentais das componentes da força de usinagem em microfresamento – experimento: fz de 10 μm , ap de 50 μm e raio de aresta de 3,287 μm . a) componentes fornecidas pelo dinamômetro na região de usinagem. b) sinal médio das componentes com intervalo de confiança de 95%. c) componentes durante a formação do cavaco, em que F_{a_i} , F_{c_i} , F_{t_i} são determinados por meio do programa ForUpDown conforme a Eq. (2), (3) e (4).

Por fim, a Fig. (8)-c apresenta o comportamento das forças de usinagem durante a formação do cavaco no processo de microfresamento em cheio. Pode-se observar uma significativa diferença entre a Força de corte (F_{c_i}) e a força ativa (F_{a_i}), isso se deve ao fato da força ativa ser uma soma vetorial, descrita pela Eq. (2), enquanto que a força de corte é uma soma de decomposições, descrita pela Eq. (3). Quando a espessura de corte alcança seu valor máximo (h_{max}) em 90°, a força de corte e a força de apoio (F_{fN_i}) possuem a mesma direção e sentido, consequentemente seus valores são os mesmos como mostrado na Fig. (8)-c. Similarmente, isto também ocorre com a força de avanço (F_{f_i}) e a força de compressão (F_{t_i}). Conforme já mencionado, existe um momento que a aresta de corte deixa de empurrar a peça e começa a puxá-la, quando $h_i = r_e$, tal fenômeno pode ser observado pelo ponto de mínimo da força F_{fN_i} na região de fresamento discordante. Também, pode-se observar por meio desta mesma figura que a força de compressão (F_{t_i}) atua com mais intensidade sobre a ferramenta de corte no lado concordante do que no discordante, pois após 90° a força F_{t_i} não decai com a mesma taxa de crescimento do lado discordante, ou seja, ela tem um atraso no seu decaimento. Isto faz com que a força de compressão média do lado discordante ($\bar{F}_{t_i} = 0,25 \text{ N}$) seja menor do que a do lado concordante ($\bar{F}_{t_i} = 0,46 \text{ N}$), chegando a uma diferença de 55%. Por outro lado, a força de corte atua com mais intensidade sobre a ferramenta de corte no lado discordante comparado com o concordante, chegando uma diferença de 15%.

A energia específica de corte durante a formação do cavaco pode ser observada na Fig. (9), a qual apresentou decaimento conforme é encontrado na literatura científica. Isto valida a caracterização da força de corte realizada pelo programa com base nas componentes da força de usinagem fornecidas pelo dinamômetro. Por meio desse gráfico percebe-se que a energia específica de corte tem um alto decaimento (fator de escala) abaixo do raio de aresta, estabilizando-se após este ponto. Isto ocorre porque abaixo do raio de aresta da ferramenta grande parte das forças de usinagem sendo geradas estão sendo direcionadas para baixo, fazendo com que o atrito entre a aresta de corte e o material da peça seja

maior, o que contribui para o aumento da força de corte. Este fato juntamente com a pequena espessura de corte nesta região conduz a altos valores de energia específica de corte.

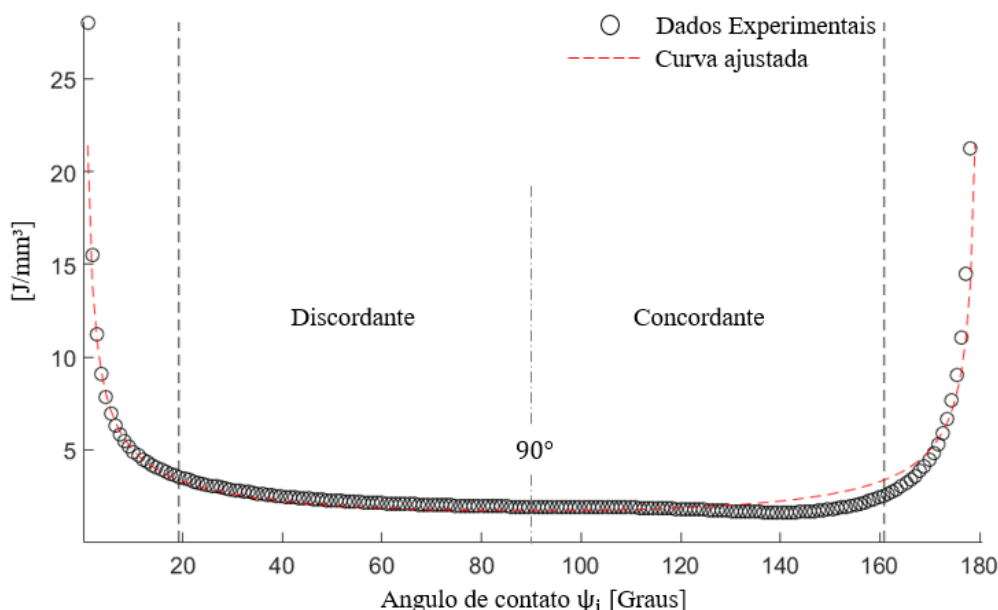


Figura 9. Dados experimentais da energia específica de corte para o experimento fz de 10 μm , ap de 50 μm e raio de aresta de 3,287 μm .

5. CONCLUSÕES

Mediante os experimentos realizados e o tratamento das forças de usinagem, concluímos que em processos de microfresamento existe uma diferença significativa entre a Força Ativa e a Força de Corte. Existe um comportamento distinto entre a atuação da força de corte e da força de compressão durante o movimento discordante da ferramenta e o movimento concordante. Durante o movimento discordante maiores intensidades de forças estão atuando sobre a superfície de saída da ferramenta, enquanto que no movimento concordante maiores intensidades de forças estão atuando na superfície de folga da ferramenta. Levantando assim a hipótese que no movimento discordante pode ocorrer um maior desgaste de cratera e no movimento concordante um maior desgaste de flanco. Além disso, o raio de aresta da ferramenta de corte pode ser evoluído a partir do ponto de mínimo da Força de apoio e o desgaste da aresta pode ser monitorado conforme este ponto se move para direita do gráfico.

6. REFERÊNCIAS

- Bao, W. Y., and I. N. Tansel, 2000, "Modeling Micro-End-Milling Operations. Part II: Tool Run-Out", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (15): 2175–92. doi:10.1016/S0890-6955(00)00055-9.
- DIN 6584, 1982, "Begriffe Der Zerspantechnik: Kräfte, Energie, Arbeit, Leistung", Berlin: Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Beuth Verlag.
- Ferraresi, D., "Fundamentos da usinagem dos Metais". São Paulo: Blucher.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., 2014, "Fundamentos de física", ed. 9, Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC.
- NBR 12545, 1991, "Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências", Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Palanisamy, P (1), R (1) Saravanan, I (2) Rajendran, and S (3) Shanmugasundaram, 2006, "Prediction of Cutting Force and Temperature Rise in the End-Milling Operation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 220 (10): 1577–87. doi:10.1243/09544054JEM542.
- Shaw, M. C. (2005). "Metal cutting principles", ed. 2. New York: Oxford University Press.
- Sekmen, Mustafa, Mustafa Gunaya, Ibrahim Ciftcib, Ihsan Korkut, and Ulvi Sekera, 2005, "The Influence of Cutting Tool Rake Angle on Cutting Forces When Machining Aluminium Alloys", *LEM 2005 - 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, 173–76.
- Stemmer, C. E., 2007. "Ferramentas de corte I", 7ed. Florianópolis: Ed.UFSC.

ANALYSIS OF THE CUTTING FORCES DURING CHIP FORMATION IN MICROMILLING

Marcel Henrique Militão Dib, marceldib@ifsp.edu.br^{1,2}

Dhiego de Godoi Dias, Dhiego.dias@usp.br¹

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br¹

¹Depto Eng. Mecânica, EESC, USP, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil

²Inst. Federal de Educ. Ciência e Tecnologia de São Paulo, CEP14801-600 Araraquara –SP, Brasil

Resumo: Cutting forces are intrinsic quantities in the mechanical material removal processes. In milling processes, these forces vary at all times, due to the dynamics of this type of operation. The force sensors (dynamometers) record the three components in the x , y , and z directions, perpendicular to each other, and, from these, other components can be determined such as mean cutting force (F_c), thrust force (F_t) and the active force (F_a). Determining these three components in the milling process has been a challenge and many papers have assumed that the mean cutting force can be represented by the active force. This strategy is adopted because the active force is the vectorial sum of the components in the x and y direction provided by the dynamometer, while the mean cutting force is the sum of the decompositions of the forces F_x and F_y in the cutting direction, and this makes their determination complex due to the quasi-circular motion that the tool performs. To solve this problem, a program was created in the MATLAB language capable of characterizing the mean cutting force during chip formation. The signal of the components in the x , y , and z directions provided by the dynamometer are recognized by the program and treated to provide F_c , F_t , and F_a . Micromilling experiments performed on RSA6061 material demonstrated that there is a significant difference between the active force and the mean cutting force and that there is a distinct behavior between the mean cutting force and the thrust force acting in upmilling and downmilling. We conclude that during the upmilling, higher force intensities are acting on the tool rake surface, while in downmilling, higher force intensities are acting on the tool clearance surface. Thus, driving the hypothesis that in the upmilling there is a greater wear of crater and in downmilling there can be a greater flank wear.

Palavras-chave: Cutting Forces, Mean Cutting Force, Active Force, Micromilling, RSA6061.