

PROCESSAMENTO DE SINAL PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM NO CORTE INTERROMPIDO UTILIZANDO O CRITÉRIO DE DETECÇÃO DE PICOS

Kandice Suane Barros Ribeiro, kandicebarros@usp.br¹

Kaciê Karoline de Araújo Trindade, kacietrindade@gmail.com²

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br²

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Campus I – Pq Arnold Schimidt, CEP 13566-590, São Carlos/SP – Brasil.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, 3000, Campus Universitário – Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal/RN – Brasil.

Resumo: A compreensão das condições envolvidas na usinagem é de grande relevância para a otimização dos processos de manufatura. Uma das principais grandezas do processo é a força de usinagem, que sofre influência de fatores como: o tipo do corte, o material usinado, os parâmetros de usinagem e a geometria da aresta de corte. No corte contínuo (torneamento e furação, por exemplo), o modelo de força de usinagem é relativamente simples e o carregamento é praticamente constante. No fresamento, a força de usinagem não é constante e os picos podem não ser periódicos (no caso de fresas com passo variável). O entendimento da força de usinagem é fundamental para operações com estreitas faixas de tolerâncias e de rugosidade, na prevenção de avarias e/ou no acompanhamento do momento de substituição da(s) aresta(s) de corte. Apesar de vários trabalhos mostrarem análises da força de usinagem no fresamento, não há uma clara definição do critério adotado, ou seja, o momento em que os valores foram obtidos (valores máximos, valores médios e/ou com ou sem sobreposição de arestas). Desta forma, este estudo analisa os sinais das componentes da força de usinagem no fresamento frontal no aço AISI 4340, com dureza de 200 HB, com o objetivo de mostrar um método de composição da resultante e definição do valor da força de usinagem. A aquisição e o processamento de dados utilizam programas baseados no software LabVIEW e, no processamento, aplica-se o conceito de detecção de picos. Os sinais das componentes de força de usinagem foram obtidos em uma plataforma National Instruments conectada a um dinamômetro triaxial à base de extensômetros, com uma taxa de aquisição de 1 kHz. Os parâmetros de corte utilizados foram definidos de acordo com os valores recomendados pelo fabricante de ferramenta. O processamento teve como base a seleção de um trecho de interesse do sinal bruto (não filtrado) e a respectiva análise local de picos/vales. A força de usinagem foi então calculada a partir da soma vetorial das componentes, de forma a apresentar uma matriz dos valores. As funções utilizadas possibilitaram o aumento da precisão nas medidas realizadas. Os resultados evidenciam um método padronizado e eficiente na determinação da força de usinagem.

Palavras-chave: força de usinagem, modelagem da força de usinagem, dinamômetro, identificação de picos e vales.

1. INTRODUÇÃO

A força de usinagem atua diretamente na capacidade de obtenção de tolerâncias estreitas e nos níveis de temperatura durante o processo de usinagem. Outro parâmetro fortemente influenciado pela força de usinagem é o tempo de vida da ferramenta devido às solicitações mecânicas e térmicas sobre a aresta de corte. Portanto, com a determinação da força é possível selecionar adequadamente o material da ferramenta, o sistema de fixação de peça e ferramenta, e a máquina-ferramenta necessária (determinando a potência requerida pelo motor da máquina durante a usinagem). Além disso, é possível determinar o índice de usinabilidade dos materiais, permitindo, dessa forma, maior controle sobre a capacidade real do processo, a otimização dos gastos com energia e os próprios custos de operação (Diniz, Marcondes e Coppini, 2008; Machado et al., 2009).

Compreender como cada parâmetro influencia na força de usinagem é relevante visto que, em alguns casos, a força é um parâmetro que determina a viabilidade do processo de fresamento. Assim, o processo de modelagem da força de usinagem tornou-se pertinente para a área de conhecimento. Os primeiros pesquisadores que estudaram esse processo de descrição de força de usinagem foram Ernst e Merchant. Eles determinaram uma relação matemática envolvendo a força de usinagem com a geometria do cavaco no corte ortogonal. O modelo foi desenvolvido atendendo condições do processo de torneamento, uma vez que considera parâmetros de geometria da ferramenta, do material usinado e do cavaco gerado pelo processo de usinagem (Ernst e Merchant, 1941 apud Astakhov, 2008).

No fresamento, mais de uma aresta pode executar o corte de maneira simultânea, a formação e a geometria do cavaco não são constantes e o corte é intermitente. Diante disso, determinar a força de usinagem nesse processo torna-se uma tarefa mais complexa. A teoria de Ernst e Merchant (1941) apud Astakhov (2008) mostra-se inadequada para modelar

força de usinagem no fresamento. Contudo, sua contribuição para determinar a relação direta da força de usinagem com a geometria da ferramenta (ângulos da geometria da cunha de corte, de cisalhamento e de saída da ferramenta) e a espessura do cavaco usinado, serviu de suporte para outros pesquisadores que objetivaram modelar a força de usinagem em operações de fresamento.

Nesse sentido, Jiang, Zhang e Yan (2016) propuseram um modelo analítico para a força de usinagem no fresamento baseado na forma geométrica do cavaco cisalhado a qual é determinada pela estrutura de hélice e da movimentação da ferramenta. A força de usinagem foi modelada considerando três estágios ao longo do tempo de contato ferramenta-peça. No primeiro e no terceiro estágio ocorre basicamente a compressão do material; no segundo, ocorre o mecanismo de cisalhamento do cavaco (toda a superfície helicoidal cortante da fresa está em contato com a peça, diferentemente do primeiro e último estágio). Com o objetivo de testar o modelo, os autores realizaram ensaios experimentais em um centro de usinagem usinando uma liga de alumínio Al7050-T7451 com uma fresa de topo reto com 20 mm de diâmetro (do fabricante Seco e modelo 35XL200). As componentes da força de usinagem foram medidas por meio de um dinamômetro piezelétrico de três componentes ortogonais (Kistler 9257 B) e um amplificador de carga (Kistler 5007). Os parâmetros de usinagem adotados como padrão na realização dos experimentos foram velocidade de corte (v_c) de 188 m/min; avanço por dente (f_z) de 0,07 mm; profundidade radial de usinagem (a_e) de 6 mm e profundidade axial de usinagem (a_p) de 4 mm.

Nessa condição, os valores das componentes da força de usinagem, " F_x ", " F_y " e " F_z ", obtidos experimentalmente foram 238 N, 94 N e 70 N, respectivamente. Enquanto que para esses mesmos parâmetros os valores calculados dessas componentes de força foram 221 N, 80 N e 65 N, respectivamente. A partir dos parâmetros adotados como padrão, variações em " a_p ", " a_e ", " f_z " e " v_c " foram realizadas. Os resultados evidenciaram que todas as três componentes da força de usinagem aumentam com o aumento da " a_p ", de " a_e " e do " f_z " e diminuem com o aumento de " v_c ". A componente de maior magnitude, " F_x ", equivalente a força de corte, aumenta de 50 N para 500 N com a variação de 1 mm para 13 mm de " a_p "; acresce de 130 N para 260 N com a variação de 2 mm para 10 mm de " a_e "; aumenta de 100 N para 340 N quando " f_z " varia de 0,03 mm e 0,11 mm; por outro lado, reduz de 300 N para 200 N quando " v_c " varia de 63 m/min para 314 m/min. Este último resultado é associado à tensão de cisalhamento e ao ângulo da geometria da cunha de corte, os quais diminuem com o incremento de " a_e " e " v_c ".

Rubeo e Schmitz (2015) desenvolveram um modelo mecanístico (experimental) de força de usinagem com base nos seguintes pressupostos: a) a força de usinagem instantânea é proporcional à área da seção transversal do cavaco ainda não cisalhado através de coeficientes de força específica empíricos; b) a força de usinagem instantânea é independente de outros parâmetros de usinagem. O modelo considera componentes instantâneas da força de usinagem (força axial – " F_a ", força normal – " F_n " e força tangencial – " F_t "). Essas componentes são funções do comprimento e espessura do cavaco no instante determinado e de coeficientes obtidos experimentalmente a partir dos valores da taxa de avanço e força estabelecidos e medidos no processo de usinagem.

Além dos modelos analíticos e mecanísticos (experimentais), também é possível modelar a força de usinagem a partir da potência de usinagem. Esse método é menos preciso e sofisticado do que os demais métodos citados. Nele, a força de usinagem é derivada da potência de usinagem obtida pela multiplicação da energia específica de corte pela taxa de remoção de material. A desvantagem desta técnica é a falta de conhecimento da direção da força de usinagem e a desconsideração da variação de espessura do cavaco (Gadalla, 1997). No fresamento, a força de usinagem tem o valor alterado constantemente, uma vez que a espessura do cavaco removido e, conseqüentemente, a pressão específica de corte são variáveis. O perfil do cavaco removido apresenta formato de vírgula, logo, realizar uma média aritmética para estimar a sua espessura implica em uma fonte de erro que compromete a precisão da medição da força de usinagem.

Liu (2009) desenvolveu um modelo dinâmico para força de usinagem no fresamento frontal. O modelo considera os parâmetros de usinagem, a geometria da ferramenta, o batimento radial dinâmico da ferramenta e a deformação da peça. O modelo necessita de coeficientes experimentais relacionados às condições de usinagem, ao material da peça e ao material e geometria da ferramenta. As equações de força foram desenvolvidas a partir do pressuposto de que a aresta de corte pode ser dividida em elementos diferenciais. Dentro de cada elemento diferencial, as componentes tangenciais e normais da força de usinagem na superfície da aresta podem ser obtidas a partir do modelo de corte oblíquo. Contudo, como as direções tangenciais e normais juntamente com a espessura do cavaco variam durante a formação do cavaco no fresamento, o modelo dinâmico adotado considera essas variações na magnitude e na direção das componentes da força de usinagem.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar dados experimentais de componentes da força de usinagem, medidos por um dinamômetro triaxial à base de extensômetros, no fresamento frontal no aço AISI 4340, para mostrar um método de processamento de dados com identificação de picos e vales para determinação da força de usinagem e comparar esses resultados com um modelo proposto na literatura, de modo a entender as limitações do modelo para estimativa da força de usinagem.

2. METODOLOGIA

O modelo adotado nesse trabalho para definição das componentes da força de usinagem utiliza como referência o desenvolvido por Liu (2009). Contudo, desconsidera o batimento radial dinâmico da ferramenta e a deformação da peça durante o contato ferramenta-peça. A redução no número de variáveis no modelo permite uma compreensão progressiva

da influência de cada fator. Ainda, as variáveis desconsideradas necessitam de experimentos dedicados e serão alvos em futuros trabalhos dessa linha de pesquisa. As Eq. (1), (2) e (3) foram utilizadas e apresentam a componente de força nas direções “x”, “y” e “z”, respectivamente. A Eq. (4) exhibe como determinar uma constante (u') empregada nas equações anteriores.

$$F_x = u' \cdot f_z \cdot \sin^{1.8}(\varphi_i) + c_1 \cdot \sin^{0.8}(\varphi_i) \cdot \cos(\varphi_i + \pi/6) \quad (1)$$

$$F_y = -\frac{u'}{2} \cdot f_z \cdot \sin^{0.8}(\varphi_i + \pi/6) \cdot \cos(\varphi_i) - c_1 \cdot \sin^{1.8}(\varphi_i + \pi/6) \quad (2)$$

$$F_z = -u' \cdot f_z \cdot c_2 \cdot \sin^{0.8}(\varphi_i) \quad (3)$$

$$u' = u_0 \cdot R \cdot \cot(\beta) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_e - \alpha_{e0}}{100}\right) \left(\frac{t_0}{f_z}\right)^{-0.2} \quad (4)$$

Ressalta-se que “ c_1 ” e “ c_2 ” são coeficientes experimentais relacionados às condições de usinagem, ao material da peça e material e geometria da ferramenta, “ u_0 ” é a energia específica de corte inicial por unidade de volume, “ f_z ” é o avanço por dente, “ β ” é o ângulo de hélice da ferramenta, “ φ_i ” é o ângulo de posição do ponto da aresta cortante em função do tempo, “ t_0 ” a espessura de cavaco indeformado inicial, “ α_r ” é o ângulo de saída da ferramenta, “ α_e ” é o ângulo de saída efetivo “ α_{e0} ” é o ângulo de saída efetivo inicial e “ R ” é o raio da ferramenta.

Os ensaios para determinação da força de usinagem foram realizados em um Centro de Usinagem CNC Romi D600, alocado no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Foi utilizada uma fresa com duas pastilhas intercambiáveis montadas em um porta-ferramenta (R390-020A20-11L), com diâmetro de 20 mm, ângulo de hélice (β) igual a 10,27° e ângulo de saída (α_r) igual a 5° (Sandvik, 2016). As pastilhas utilizadas foram da empresa Sandvik Coromant, modelo CoroMill R390-11T304M-PM da classe 1030 (ISO P30). Essas pastilhas têm 10 mm de comprimento efetivo de aresta de corte, raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de posição de 90°, substrato de metal duro com revestimento de (Ti, Al)N baseado na técnica PVD (Sandvik, 2016).

Com o intuito de entender o comportamento dinâmico das componentes de força de usinagem, ensaios foram realizados durante um processo de fresamento frontal. Para indicação das componentes de força de usinagem utilizou-se um dinamômetro triaxial à base de extensômetros. O instrumento foi projetado para indicar carregamentos de até 1 kN e manufaturado no referido laboratório. Os extensômetros utilizados no dinamômetro foram da empresa HBM de modelo LY11-3/350 (resistência nominal de 350Ω). A fim de concentrar os esforços mecânicos na região de medição dos transdutores, dois materiais foram empregados na manufatura do dinamômetro: o aço AISI 4340 para bases superior e inferior; e o Al 7075-T6 para o elemento elástico (local de disposição dos transdutores). A calibração estática de cada eixo do dinamômetro se deu em cinco séries de carregamento e descarregamento na faixa de 0 a 1000 N em uma máquina de ensaios mecânicos (SHIMADZU Autograph AG-X). Os detalhes do projeto, da manufatura e da calibração do dinamômetro, assim como as suas principais características e resultados de testes de validação do instrumento, estão descritos em Ribeiro (2016).

O material usinado foi o aço AISI 4340, com dureza 200 HB e dimensões de 55 x 40 x 20 mm. O comprimento usinado foi de 220 mm (quatro passes de 55 mm). Esse corpo de prova foi fixado à base superior do dinamômetro por meio de dois parafusos M6 x 0,7 mm, conforme esquematizado na Fig. (1). Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte (v_c) de 200 m/min; avanço por dente (f_z) de 0,025 mm; e a profundidade radial de usinagem (a_c) de 10 mm (50% do valor de diâmetro da fresa). Dois parâmetros de profundidade axial de usinagem foram utilizados: $a_{p1} = 0,5$ mm e $a_{p2} = 1,0$ mm. O tipo de corte foi concordante com uma estratégia de passes paralelos. O processo foi realizado isento de fluido de corte e o máximo valor do desgaste permitido foi $VB_B = 0,10$ mm.



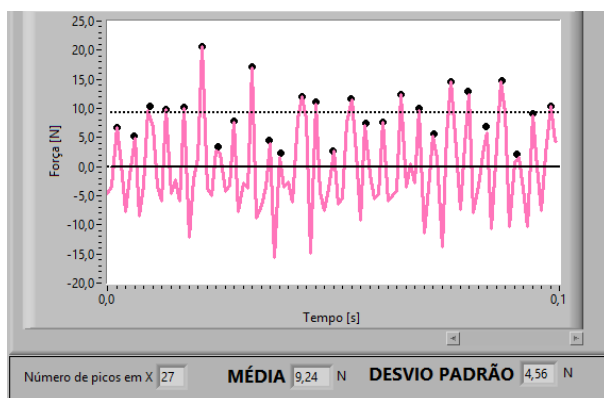
Figura 1. Configuração do corpo de prova para o ensaio de força de usinagem.

A aquisição de dados utilizou o software LabVIEW e o hardware National Instruments com os seguintes componentes: a) três conectores NI RJ50; b) um módulo NI 9237; c) um Chassis NI CompactDAQ; d) e um microcomputador. O hardware permite a utilização de uma ponte de Wheatstone digital com tensão de alimentação de 10 V. Desenvolveu-se também um programa para aquisição do sinal e outro para o processamento dos dados de força, ambos elaborados em LabVIEW. O primeiro programa utilizou uma taxa de aquisição de 1 kHz para cada um dos três canais, relacionados aos eixos ortogonais (F_X , F_Y e F_Z). O segundo, por sua vez, permite a leitura de arquivos nos formatos TDMS ou TXT, a apresentação dos dados de cada eixo de medição em gráficos separados e uma análise local e global das componentes da força de usinagem em termos de seus valores de picos e/ou vales (identificação de máximos e mínimos locais). O programa também possibilita a análise estatística com média e desvio padrão da amostra de picos e/ou vales identificados e o cálculo do módulo da força de usinagem do trecho selecionado do sinal.

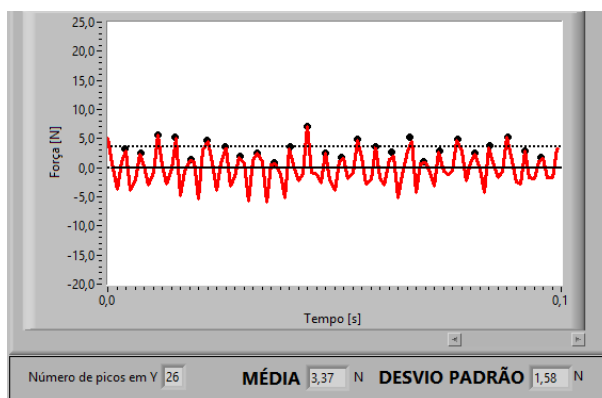
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das componentes da força de usinagem mostrou a magnitude ligeiramente diferente durante a entrada e a saída da ferramenta (primeiros e últimos 10 mm do corte) quando comparado aos valores no centro do comprimento usinado. Dois fatos são relevantes para esses resultados: a) o valor de profundidade radial de usinagem não está completo no início do corte; b) a superfície de folga da ferramenta de corte não está completamente apoiada sobre a superfície usinada. Considerado estes pontos, o estudo da força tendo como parâmetro de referência o tempo total monitorado não permite uma análise fiel do comportamento do processo. Assim, o programa de processamento dos dados de força de usinagem era flexível quanto à quantidade de pontos que formam o intervalo analisado. Um trecho representativo e estável de 100 pontos (100 milissegundos de corte) foi utilizado para as análises apresentadas neste estudo. Essa quantidade de pontos foi definida para facilitar a visualização dos picos e vales, e do comportamento da curva de força em função do tempo. A média dos picos de força identificados calculada para cada componente e resultante não é distinta estatisticamente em um intervalo de confiança de 95,45% com o aumento do número de pontos no intervalo representativo de usinagem.

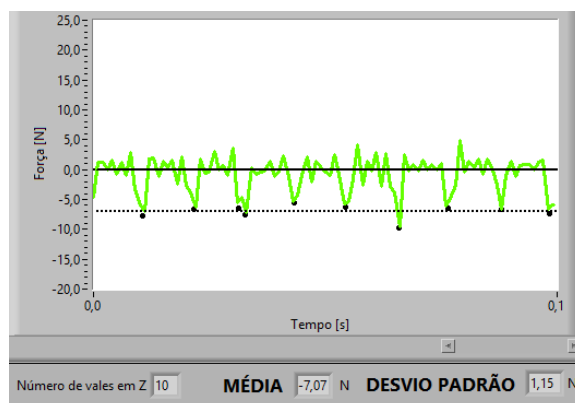
No ensaio com a_p de 0,5 mm, os dados das componentes da força usinagem adquiridos indicaram o comportamento conforme mostrado na Fig. (2).



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Componentes da força de usinagem para ensaio com $a_p = 0,5$ mm: eixo “x” (a), eixo “y” (b), eixo “z” (c).

Analisando a média dos picos e vales das componentes da força de usinagem identificadas na Fig. (2a), Fig. (2b) e Fig. (2c), obteve-se para o eixo “x”, “y” e “z”, respectivamente, os valores médios dos picos/vales de força de $F_X = 9,2 \pm 9,2$ N, $F_Y = 3,4 \pm 3,2$ N e $F_Z = -7,1 \pm 2,4$ N. Esses valores foram calculados com base na análise do trecho significativo do processo pela função definida em LabVIEW de detecção de picos. Os valores de pico são os identificados na Fig. (2) como círculos pretos preenchidos. Após a detecção de todos os picos e vales da amostra, uma segunda função de dados estatísticos foi utilizada para retorno da média (identificada no gráfico por uma linha tracejada preta) e desvio padrão da amostra, o qual foi indicado em uma célula na área inferior dos gráficos.

A Fig. (3) apresenta a segunda etapa no processo de determinação da força de usinagem. A força de usinagem foi definida ponto a ponto a partir das três componentes ortogonais de força com base no conceito de soma vetorial, no qual o módulo do vetor resultante equivale matematicamente à raiz da soma do quadrado das componentes em um dado intervalo de tempo. O comportamento da força de usinagem no intervalo pode ser compreendido com a análise da Fig. (3). A força de usinagem “ F_U ” característica para os parâmetros de ensaio utilizados é de $11,0 \pm 7,4$ N.

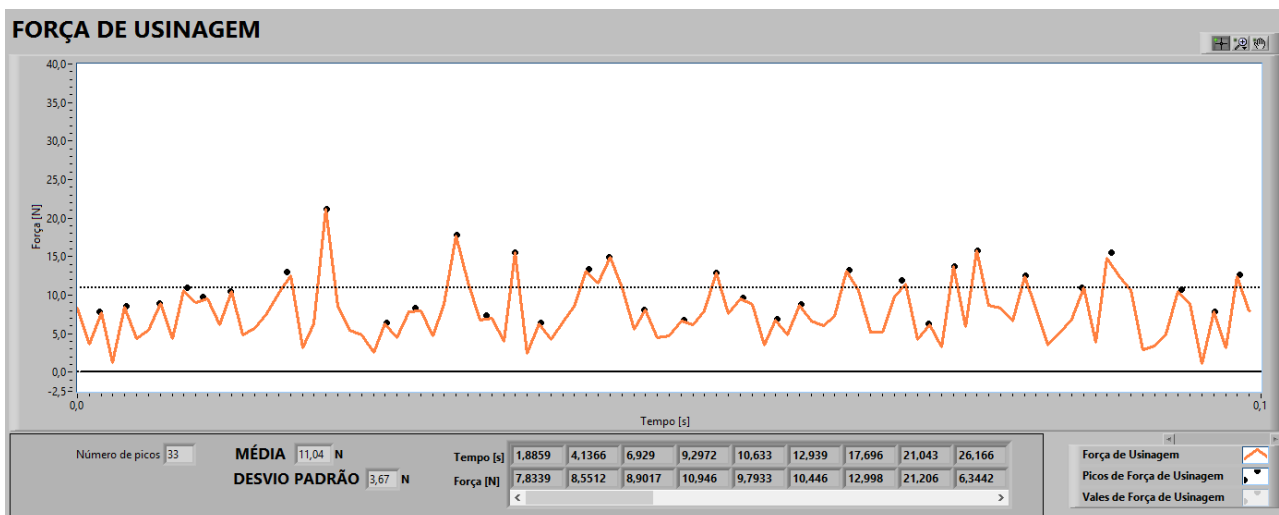


Figura 3. Força de usinagem para ensaio com $a_p = 0,5$ mm.

O método baseado na identificação de picos, de acordo com a Fig. (3), apresenta o valor de força de usinagem a ser utilizado, por exemplo, no dimensionamento de dispositivos de fixação (peça e ferramenta). Vale ressaltar que métodos baseados na corrente elétrica do motor para determinação da potência e, posteriormente, da força de usinagem causam diferenças significativas em função da curva de rendimento do motor e da eficiência do sistema. Ainda, a identificação de picos possibilita o monitoramento da fase ativa e passiva de corte. No período passivo, o qual é dependente da profundidade radial de usinagem e do ângulo de hélice da ferramenta, é possível observar níveis menores de força, que podem ser atribuídos ao atrito da aresta de corte com a superfície já usinada. Por outro lado, também é possível identificar a superposição de arestas no corte. Assim, a análise pode ser facilmente extrapolada para determinação do valor da força de usinagem em demais condições de fresamento. A proposta deste método foi possibilitar a utilização do mesmo programa e a mesma plataforma para realizar, a aquisição, o processamento e a análise dos dados obtidos. Essas são as principais vantagens do método desenvolvido.

A Fig. (4) indica o comportamento da força de usinagem no ensaio com “ a_p ” de 1,0 mm e corte concordante.

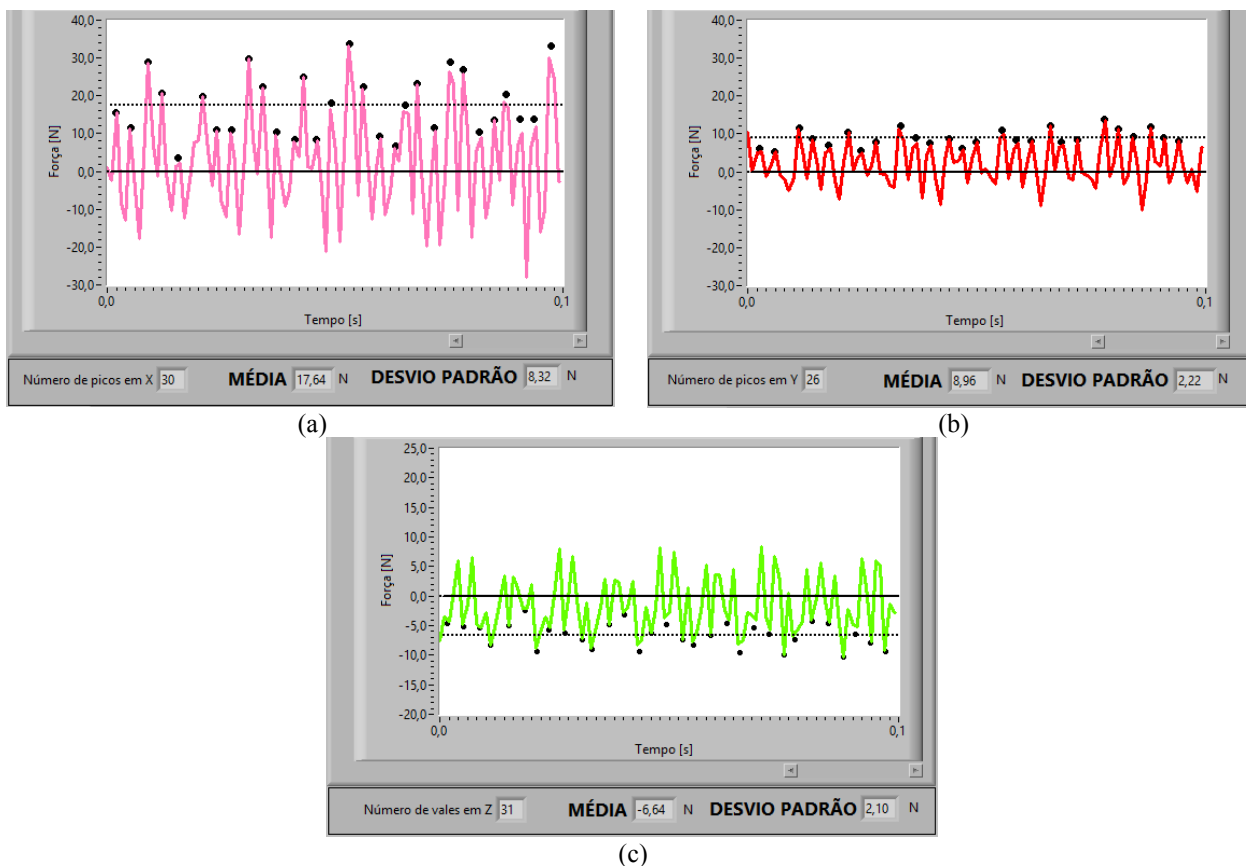


Figura 4. Componentes da força de usinagem para ensaio com $a_p=1,0$ mm.

Considerando o mesmo método descrito para determinação das componentes da força de usinagem, os níveis de força alcançados em cada componente no trecho representativo da amostra, indicou os valores de $F_X = 17,6 \pm 16,6$ N, $F_Y = 9,0 \pm 4,4$ N e $F_Z = -6,6 \pm 4,2$ N.

A Fig. (5) apresenta o resultado do módulo da força de usinagem para o trecho analisado do ensaio de força de usinagem com $a_p=1,0$ mm. A força de usinagem característica do intervalo apresentou um valor de $F_U = 21,4 \pm 9,9$ N.

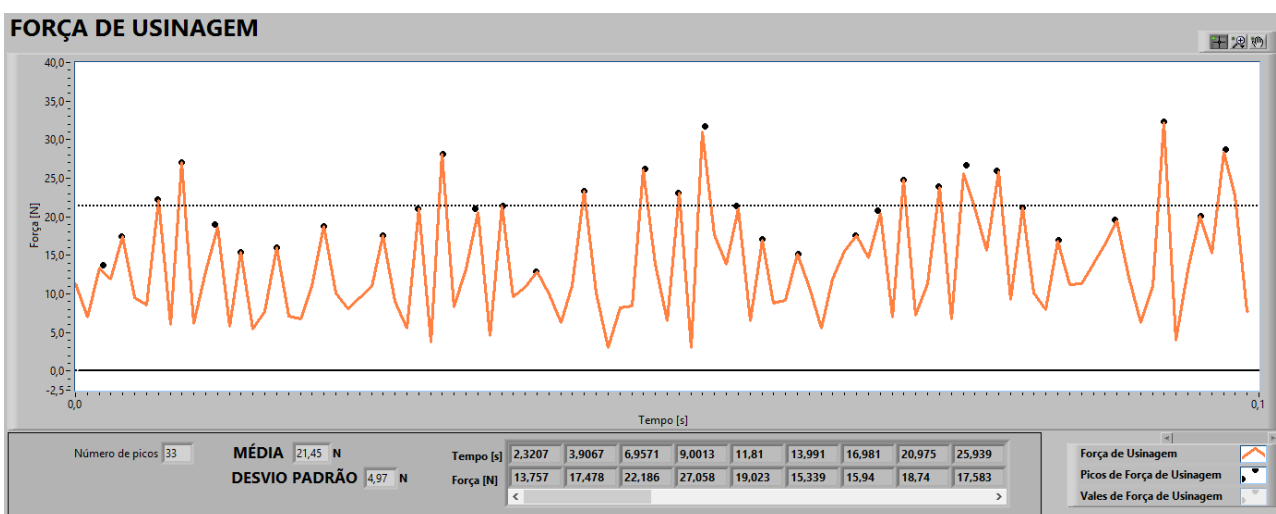


Figura 5. Força de usinagem para ensaio com $a_p=1,0$ mm.

Comparando os resultados de força de usinagem obtidos nos ensaios realizados com “ a_p ” de 0,5 mm e de 1,0 mm, pode-se confirmar que o valor de força de usinagem com maiores profundidades de corte é incrementado e uma mostra uma relação aproximadamente linear com os valores de “ a_p ”. Nos ensaios realizados, a razão obtida entre a média de picos de força de usinagem para ensaio de “ a_p ” de 0,5 mm e de 1,0 mm foi de 1,94. Ainda, um resultado comum aos dois

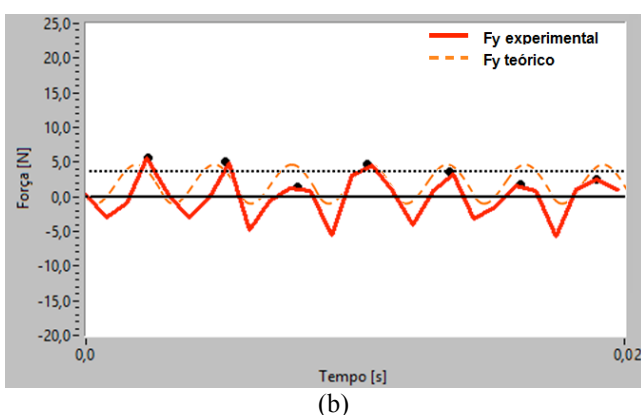
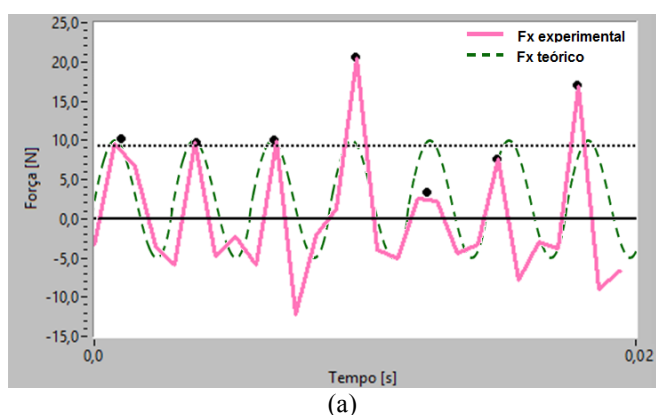
ensaios realizados que pode ser apontado é a preponderância da resultante da força na direção de deslocamento da ferramenta (Fig. (2a) e na Fig. (4a)). Nesta direção e sentido, a aresta corta a maior espessura do cavaco (f_z), enquanto na direção perpendicular (Fig. (2b) e na Fig. (4b)), a espessura do cavaco é mínima.

Realizou-se uma comparação dos valores encontrados experimentalmente, nesta pesquisa, com valores de um simulador de força, torque e potência de usinagem (Kennametal, 2017). O valor de tensão de escoamento para o aço AISI 4340 utilizado para a simulação foi de 1291 N/mm^2 , de acordo Anazawa et al. (2012). Os demais parâmetros utilizados para a simulação foram descritos no item metodologia. Desta forma, para o " a_p " de 0,5 mm, a força de usinagem teórica calculada foi de 8,4 N; e para o " a_p " de 1,0 mm, a força de usinagem teórica apresentou valor de 16,9 N. Os valores de força de usinagem obtidos experimentalmente para as mesmas condições apresentam uma discrepância de 23,6% e 20,3%, para ensaio com " a_p " de 0,5 mm e de 1,0 mm, respectivamente. Contudo, em ambos os casos, os valores simulados pertencem ao intervalo de 1 desvio-padrão dos dados experimentais.

Rizal et al. (2015) desenvolveram um dinamômetro triaxial rotativo e realizaram testes de usinagem para avaliar o desempenho da medição das componentes de força de usinagem no fresamento frontal. Porém, os autores não evidenciam o método utilizado para o processamento dos dados e apenas realizaram uma análise gráfica dos níveis das componentes da força de usinagem obtidas em cada um dos ensaios. Nesse caso, não é possível entender o método utilizado para determinação dos valores e da dispersão das componentes e/ou da força de usinagem. Assim, o desenvolvimento do atual trabalho mostrou um método para análise, composição das componentes e da força de usinagem para um trecho significativo do processo de fresamento.

Em uma terceira etapa deste trabalho, o objetivo foi modelar o comportamento das componentes da força de usinagem, utilizando uma modificação no modelo sugerido por Liu (2009). A ideia neste caso foi conhecer as variáveis experimentais necessárias ao modelo para, em futuras pesquisas, determinar os valores e o comportamento da força de usinagem no fresamento sem a necessidade de ensaios experimentais. Vale ressaltar que, comparado aos processos com corte contínuo, a modelagem da força de usinagem no fresamento deve considerar muitas variáveis, como por exemplo: o ângulo de hélice, o número de arestas no corte, o ângulo entre as arestas de corte (principalmente no caso de passo variável), a variação na espessura do cavaco, o ângulo de contato ferramenta-peça (função da profundidade radial de corte e ângulo de hélice), etc. A Fig. (6) mostra uma comparação entre as componentes de força de usinagem nas direções "x", "y" e "z", medidas experimentalmente nesse trabalho, e simuladas teoricamente, utilizando uma adaptação do modelo proposto por Liu (2009).

Para critério de cálculo, consideraram-se as constantes " c_1 " – relação entre as forças radial e tangencial de usinagem – e " c_2 " – relação entre as forças axial e tangencial de usinagem – igual a 1,22 e 0,4, respectivamente. Para a energia específica de corte inicial por unidade de volume " u_0 " (constante relacionada à pressão específica de corte) adotou-se $9,5 \text{ J/mm}^3$, uma vez que esse foi o valor que melhor se adequou aos resultados obtidos nesse experimento para o aço AISI 4340. Para a espessura de cavaco indeformado inicial " t_0 " foi utilizado 0,025, valor proporcional ao " f_z ". As constantes " c_1 ", " c_2 ", " u_0 " e " t_0 " foram adotadas através de ajuste experimental, com o objetivo de combinar as características da curva à magnitude da força determinada empiricamente. O ângulo de saída " α_r " da ferramenta era de 5° . Desse modo, o ângulo de saída efetivo " α_e " resultou em $17,8^\circ$ e o ângulo de saída efetivo inicial " α_{e0} " foi 0° , ambos baseados no trabalho de Liu (2009). Os demais parâmetros inerentes à geometria da ferramenta e as condições de usinagem foram citados na metodologia deste trabalho.



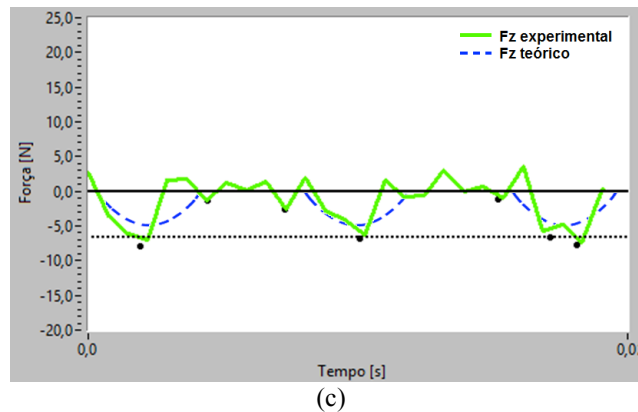


Figura 6. Comparação entre as componentes da força de usinagem obtidas teoricamente e experimentalmente para ensaio com $a_p = 0,5$ mm.

Analisando a Fig. (6) nota-se que o modelo teórico modificado descreve o comportamento das componentes da força apresentado nesta seção. Entretanto, tem a peculiaridade de requerer o ajuste das constantes “ c_1 ” e “ c_2 ” para expressar claramente a magnitude da força de usinagem do fresamento. A principal característica desse método está na descrição do comportamento das componentes da força, apresentando uma localização aproximada de seus picos e vales em relação ao tempo. Os parâmetros que mais influenciam no comportamento da curva, de acordo com as Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4), são o raio da ferramenta, o avanço por dente e ângulo de hélice. O aumento do raio da ferramenta e do avanço por dente provoca, individualmente, o aumento acentuado da força de usinagem, enquanto que o aumento no ângulo de hélice provoca redução da força.

Os resultados obtidos por simulação possuem limitações diante das condições de contorno empregadas e conseguem representar apenas um comportamento global do processo. Não obstante, o método proposto por Liu (2009) indica a descrição de um processo de usinagem a partir de um modelo que depende de variáveis experimentais para sua configuração. Assim, dentre os três métodos estudados e apresentados neste trabalho, pode-se destacar o método de detecção de picos e vales como o mais significativo para representação do processo de corte visto que possui como base dados de processos reais adquiridos experimentalmente.

A variação dos picos de força obtidos experimentalmente pode ser associada a diversos fatores do processo: a) batimento radial dinâmico no sistema de montagem de ferramenta; b) pequenas variações de dureza na microestrutura do material usinado; c) alterações na microgeometria da aresta de corte ao longo do processo. Com relação ao batimento radial dinâmico, o modelo proposto por Liu (2009) permite realizar considerações a partir da expansão das equações. Contudo, medir os valores do batimento radial dinâmico durante o corte requer transdutores específicos e em, pelo menos, duas direções. Com relação à possibilidade de pequenas variações de dureza na microestrutura do material usinado, ensaios foram realizados no corpo de prova, mas significativas diferenças nos valores não foram identificadas. Finalmente, pequenas alterações na microgeometria da aresta de corte (microlascamentos e/ou desgaste de entalhe) também podem causar variações no comportamento das componentes da força de usinagem. Adotou-se ao longo dos ensaios o valor de $VB_B = 0,1$ mm com o objetivo de minimizar a influência do valor do desgaste e avarias nos resultados de força de usinagem. Contudo, essa influência é inerente ao processo de fresamento.

4. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir, para a análise dos sinais das componentes de força de usinagem durante o fresamento frontal do aço AISI 4340, que:

- um método de definição dos valores das componentes e da composição da resultante (força de usinagem) baseado na identificação de picos e considerações estatísticas, em trecho significativo de dados experimentais, foi realizado;
- uma comparação dos resultados experimentais e o simulador de força, torque e potência mostrou uma diferença de 23,6% e 20,3% para as profundidades axiais de usinagem de 0,5 e 1 mm, respectivamente, com intervalo de confiança ± 2 desvios padrão;
- a definição dos valores das constantes “ c_1 ”, “ c_2 ” e “ u_0 ” foi requerida para adequar o modelo proposto na literatura de forma a prever o comportamento das componentes da força de usinagem no fresamento frontal. As constantes definidas mostraram-se adequadas aos dados obtidos experimentalmente.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-ANP 14) pelo fomento da pesquisa;

Ao Laboratório de Metrologia da UFRN, pelo suporte nas atividades de medição e de calibração de instrumentos.

6. REFERÊNCIAS

- Anazawa, R.M.; Abdalla, A.J., Hashimoto, T.M., Pereira, M.S. “Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300m após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos”. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico. Atibaia, 2012. Disponível em <<http://www.metallum.com.br/TTT2012/ANAIS/PDF/01-005.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2017.
- Diniz, A. E., Marcondes, F.C. e Coppini, N. L., 2008, “Tecnologia de usinagem dos materiais”, Ed. Artliber, São Paulo, Brasil.
- Ernst, H. e Merchant, M. E., 1941, “Chip formation, friction and high quality machined surfaces”, Surface Treatment Metals ASM 29, pp. 299–378. In: Astakhov, V. P. and Outeiro, J. C., 2008, “Metal Cutting Mechanics. Finite element modelling”.
- Gadalla, M., 1997, “Improving the accuracy of parametric surfaces using cutting force synthesis and surface offset techniques”, Ph.D. thesis, The University of Western Ontario, Ontario.
- Jiang, F., Zhang, T. e Yan, L., 2016, “Analytical model of milling forces based on time-variant sculptured shear surface”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 115-116, No. 1, pp. 190-201.
- Kennametal, 2017. Calculadora Kennametal. Disponível em: <<http://www.kennametal.com/pt/resources/calculators/end-milling/force-torque-and-power.html>>. Acesso em: 20 jan. 2017.
- Machado, A. R. et al., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil.
- Ribeiro, K. S. B., 2016, “Projeto e construção de dinamômetro triaxial para avaliação de carregamentos na usinagem”, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, pp.100.
- Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., Haron, C. H. C., 2015, “Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling processes”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 0888-3270, No. 52-53, pp. 559-576.
- Rubeo, M. A. e Schmitz, T. L., 2016, “Mechanistic force model coefficients: A comparison of linear regression and nonlinear optimization”, Procedia Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 311-321.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

SIGNAL PROCESSING FOR EVALUATING CUTTING FORCE IN INTERRUPTED CUTTING USING THE PEAK DETECTION CRITERIA

Kandice Suane Barros Ribeiro, kandicebarros@usp.com¹

Kaciê Karoline de Araújo Trindade, kacietrindade@gmail.com²

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br²

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Campus I – Pq Arnold Schmidt, Postcode 13566-590, São Carlos/SP – Brazil.

²Department of Mechanical Engineering, Center of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, 3000, Campus Universitário – Lagoa Nova, Postcode 59078-970, Natal/RN – Brazil.

Abstract: Understanding the cutting conditions in machining processes is relevant for the optimization of manufacturing operations. One of the main variables in machining processes is the cutting force, which is influenced by cutting type, machined material, machining parameters and cutting edge geometry. In continuous cutting (e.g. turning and drilling), the cutting force behavior is relatively simple and its levels are nearly steady. Nonetheless, in milling, as an interrupted cutting operation, the cutting force is not regular and the peaks may not be periodic (in the case of variable pitch cutters). Due to this, cutting force knowledge is a key point to operations with narrow ranges of surface roughness and tolerances, in preventing malfunctions and/or in monitoring tool life. Although several studies show cutting force analysis in milling, there is no clear definition on the adopted criteria, i.e. which values were acquired (maximum values, average values and/or with or without the presence of cutting edges overlapping). In order to present the method for composition of cutting force and definition of its value, experiments were conducted to acquire cutting force components data from the milling of AISI 4340 steel workpiece (200 HB). Instantaneous cutting force signals were acquired on a National Instrument platform by a triaxial strain gauge-based dynamometer at the rate of 1 kHz. The measured data was acquired and processed by a computer program written in LabVIEW in which the concept of peak detection was applied. The cutting parameters were chosen according to the tool's supplier guide. Likewise, the signal processing was based on a selected raw signal bandwidth over which the local analyses of peaks were performed. Cutting force was calculated from the vector addition of the orthogonal components to present an array of values. LabVIEW pre-functions were used and made it possible to increase the accuracy of measurements. The results show a standardized and efficient method for determining the cutting force.

Keywords: cutting forces, cutting forces modeling, dynamometer, peak and valley detection