

ANÁLISE DOS EFEITOS DA VIBRAÇÃO FORÇADA NA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE BALANÇO NO FRESAMENTO

Lucas Gomes Camargo

Universidade Federal de Santa Catarina - Rua Lauro Linhares, 1850 - Trindade, Florianópolis – SC.
lucas.g.c@posgrad.ufsc.br

Adriano Fagali de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
adriano.fagali@ufsc.br

Thiago Antonio Fiorentin

Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
thiago.antonio@ufsc.br

Lucas André Moreira

Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
lucasandremoreira2010@gmail.com

Resumo. A vibração durante o processo de fresamento resulta em qualidade da superfície inadequada e perda de precisão dimensional da peça. A vibração forçada pode ser induzida pela excitação da ferramenta em sua frequência natural durante o corte. Esta frequência natural é função do comprimento de balanço da ferramenta, onde o aumento reduz a frequência natural e facilita a sua excitação pela atuação do gume no material. Neste caso, alterar a frequência de excitação para não coincidir com a frequência natural da ferramenta é uma opção. Neste contexto, o presente trabalho investiga a variação da qualidade da superfície obtida quando a excitação da ferramenta é próxima ou coincidente com a sua frequência natural. Diferentes comprimentos de balanço foram considerados na obtenção da frequência natural. Os resultados apontam que para valores reduzidos do comprimento de balanço, a vibração forçada não é dominante no fenômeno vibracional, mas contribui para a perda de qualidade da superfície. Por outro lado, para valores superiores de comprimento de balanço, a vibração forçada torna o corte altamente instável para uma faixa de $\pm 10\%$ em torno da frequência natural, o que resulta em uma grande redução de qualidade da superfície.

Palavras chave: Fresamento. Vibração forçada. Comprimento de balanço. Frequência natural. Qualidade da superfície.

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos vibratórios estão cada vez mais presentes na indústria em geral. Entre os efeitos indesejados estão a fadiga mecânica de equipamentos devido aos elevados valores de vibração, a redução do nível de conforto vibratório, problemas de qualidade de algumas peças e a geração de ruído devido a vibração excessiva (Fiorentin *et al.*, 2016). A indústria automotiva e sua cadeia de fornecedores estão entre as mais afetadas pelos fenômenos vibratórios (Oliveira *et al.*, 2008).

A produtividade na usinagem é limitada por vibrações entre a peça e a ferramenta durante o processo de corte. Tais vibrações reduzem a precisão dimensional da peça e a qualidade da superfície, além de aumentar a taxa de desgaste da ferramenta (Totis *et al.*, 2014). Neste caso, a sua ocorrência durante o fresamento pode reduzir a vida da ferramenta em até 50% dependendo de sua severidade (Albertelli, *et al.*, 2014).

No processo de fresamento, o impacto causado pela entrada de cada gume no material excita uma ampla gama de frequências naturais estruturais (máquina, fixação, ferramenta e peça) que resultam em vibrações forçadas e auto excitadas (Song *et al.*, 2014). As vibrações forçadas são excitadas pela componente periódica da força de usinagem na frequência de passagem dos dentes (Polli, 2005). As vibrações auto excitadas resultam do efeito regenerativo da peça durante a usinagem. Este fenômeno ocorre pela influência da ondulação deixada na superfície da peça pela passagem do gume anterior na atual espessura do cavaco não-deformado que atua no gume na mesma posição angular, o que gera variações na força de usinagem (Totis *et al.*, 2014).

Aguiar *et al.*, (2013) apresentam que para evitar a vibração durante a usinagem, a frequência de atuação do gume deve diferir das frequências naturais e harmônicas do sistema. A frequência natural do sistema é função, dentre outros

fatores, da relação comprimento/diâmetro da ferramenta (L/D), onde o aumento do comprimento de balanço (L) reduz a frequência resultante.

No fresamento de moldes e matrizes com cavidades profundas, é necessário empregar altos valores de comprimento de balanço, o que pode levar à instabilidade do processo de remoção de cavacos e consequentemente vibração do sistema (Gao e Meng, 2010). Os resultados obtidos por Gao e Meng (2010) indicam que o primeiro modo de vibração do sistema apresenta um crescimento significativo da amplitude da vibração com o aumento do comprimento de balanço, sendo o mais susceptível a produzir instabilidades vibracionais durante o processo de fresamento.

Nos resultados de Aguiar *et al.* (2013), a coincidência da segunda harmônica da frequência de atuação do gume com a frequência natural do sistema gerou instabilidade no processo, o que reduziu significativamente a qualidade da superfície para este caso. Porém, em outro caso em que as frequências foram próximas, mas não coincidentes, o processo obteve resultados satisfatórios. Com isso, uma pequena modificação na frequência de atuação do gume para não coincidir com a frequência natural pode tornar o processo estável e consequentemente produzir uma superfície com qualidade adequada.

Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar os efeitos da variação da frequência de atuação do gume em torno da frequência natural do sistema para diferentes comprimentos de balanço da ferramenta. A frequência natural do sistema é obtida nas diferentes condições dinâmicas. Com estes valores é possível ajustar o processo de fresamento para que o mesmo excite o sistema na sua frequência natural ou em uma de suas harmônicas. Do mesmo modo, é possível observar o comportamento do processo de usinagem quando a frequência de atuação do gume é próxima, mas não coincidente com estas frequências críticas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de avaliar o comportamento dinâmico do sistema, a frequência natural do sistema (máquina-ferramenta / spindle de alta rotação / porta-ferramentas / ferramentas) foi obtida através de uma análise modal experimental para diferentes comprimentos de balanço. As ferramentas empregadas foram 3 fresas inteiriças de metal duro (2ELST 0602), com 6 mm de diâmetro, 2 gumes de corte e ponta esférica, para os valores de comprimento de balanço de 30, 45 e 80 mm. A máquina ferramenta foi o centro de usinagem CNC três eixos ROMI D600 com comando numérico FANUC Oi-MC, equipado com o *eletro spindle* Tecnodrill® EMT90-173522-W de 35.000 RPM.

Para a obtenção das frequências naturais, foi aplicado um breve impacto mecânico na ferramenta em seu sentido radial através de um martelo de impacto com massa 100 g (Brüel & Kjær modelo 8203). A ferramenta estava instrumentada com um acelerômetro piezoelétrico de massa 2g e frequência de aquisição de 10kHz (PCB Piezotronics modelo 353B16) para aquisição do sinal, o qual foi interpretado por um analisador de sinais (LMS modelo Pimento). O acelerômetro converte o sinal mecânico em um sinal elétrico, o qual é amplificado e utilizado pelo analisador de sinais na realização da Transformada Rápida de Fourier. Através desse procedimento é possível obter a função resposta em frequência, razão entre o sinal de resposta pelo sinal de excitação. Nela é possível identificar as frequências naturais de cada modo de vibração. Esta medição é realizada com a ferramenta montada na máquina.

As frequências naturais obtidas para os comprimentos de balanço de 30 mm, 45 mm e 80 mm são de 4006 Hz, 2404 Hz e 791 Hz, respectivamente. A partir destes valores, foram calculadas faixas de frequência 10% acima e 10% abaixo das frequências naturais e suas harmônicas. Este procedimento foi realizado para que a frequência de atuação do gume se diferenciasse significativamente da frequência natural e ao mesmo tempo as faixas de diferentes harmônicas não se interceptassem. Desta forma, têm-se as 3 condições a serem aplicadas nos experimentos de fresamento: na frequência natural (ou harmônica) e 10% acima/abaixo deste valor, para os 3 comprimentos de balanço, em um total de 9 experimentos.

Para os experimentos foram selecionados os valores do 5º harmônico do $L=30$ mm, o 3º harmônico do $L=45$ mm e o 1º harmônico do $L=80$ mm, para que assim os parâmetros de usinagem pudessem ser próximos entre os experimentos e ainda manter a velocidade de corte dentro do recomendado pelo catálogo da fabricante da ferramenta. A rotação da ferramenta (n) foi calculada a partir da frequência pela Eq. (1).

$$n = (f \cdot 60) / z \quad [RPM] \quad (1)$$

Onde f é a frequência natural e z é o número de gumes da ferramenta. A velocidade de corte (v_c) é calculada considerando o diâmetro efetivo (D_{ef}) dado pela Eq. (2).

$$D_{ef} = 2 \cdot \sqrt{a_p(D - a_p)} \quad [mm] \quad (2)$$

Nos experimentos foram aplicados uma profundidade de corte (a_p) de 0,2 mm e avanço por gume (f_z) de 0,1 mm. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de corte dos experimentos realizados. A trajetória aplicada no fresamento foi um passe único com penetração de trabalho total para que o seu valor não influenciasse nos resultados. A usinagem foi realizada em aço-ferramenta P20, visto sua grande aplicação na indústria de moldes de injeção de plástico.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem dos experimentos.

Experimento	Comprimento de balanço [mm]	Frequência [Hz]	Rotação [RPM]	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/min]
1	30	721 (-10% da 5ª harmônica)	21632	146	4326
2		881 (+10% da 5ª harmônica)	26440	179	5288
3		801 (5ª harmônica)	24036	163	4807
4	45	721 (-10% da 3ª harmônica)	21636	146	4327
5		881 (+10% da 3ª harmônica)	26444	179	5289
6		801 (3ª harmônica)	24040	163	4808
7	80	712 (-10% da freq. natural)	21357	145	4271
8		870 (+10% da freq. natural)	26103	177	5221
9		791 (Frequência natural)	23730	161	4746

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 é possível observar as imagens das peças após os passes de fresamento. São identificados padrões oscilatórios bem definidos pelas sinuosidades nas extremidades do passe, principalmente para os comprimentos de balanço de 30 mm e 45 mm (experimentos 1 ao 6 conforme Tabela 1). As distâncias entre os picos dessas ondulações são de várias vezes o valor do avanço por gume, o que caracteriza um fenômeno vibratório presente durante o processo de usinagem.

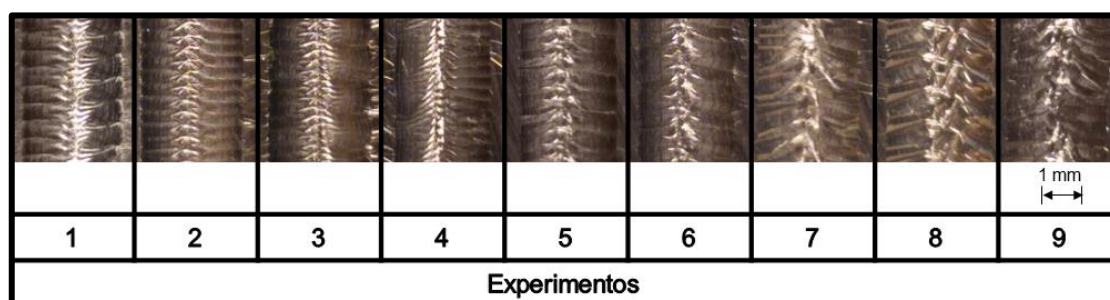


Figura 1. Passes de fresamento dos experimentos.

Na Figura 2a são apresentadas as médias gerais dos parâmetros de rugosidade medidos para cada comprimento de balanço da ferramenta. O valor de R_a apresentado nesta figura representa os efeitos combinados da vibração e do próprio movimento de corte da ferramenta durante a usinagem. Desta forma, os efeitos da vibração são atenuados pela média aritmética característica deste parâmetro. Por outro lado, os parâmetros R_t e R_z apresentam as alturas máximas encontradas no perfil e por isso os seus valores representam as oscilações da ferramenta durante o passe.

Pelos resultados apresentados na Figura 2a é possível verificar que não há diferenças significativas entre os parâmetros de rugosidade obtidos para ferramentas com comprimentos de balanço de 30 mm e 45 mm. Como poderá ser verificada posteriormente, para esta faixa de valores de comprimento de balanço a vibração do processo pode ser atenuada em função dos parâmetros estabelecidos. Por outro lado, o elevado crescimento das médias de R_t e R_z em relação à R_a para o comprimento de balanço de 80 mm, aliado à maior variabilidade dos resultados, indica que para este comprimento de balanço da ferramenta a vibração exerce uma grande influência nos resultados. Na Figura 1, é possível observar que para o conjunto de experimentos deste comprimento de balanço (7 ao 9) o corte ocorreu de forma mais instável.

Na Figura 2b são apresentados os valores de rugosidade obtidos em cada um dos passes, onde o índice “e” representa o lado esquerdo e o índice “d” representa o lado direito de cada passe pela Figura 1. Para os comprimentos de balanço de 30 mm e 45 mm, foram observadas diferenças significativas nos resultados de rugosidade entre os lados dos passes 1, 3, 5 e 6, onde o lado esquerdo apresenta corte discordante enquanto o lado direito apresenta corte concordante (Figura 2b).

Devido a estes comportamentos, não se é possível afirmar que há relação entre os valores de rugosidade observados e a frequência de excitação para cada caso. Desta forma, atribui-se a ocorrência das vibrações observadas principalmente aos efeitos regenerativos do processo de fresamento (vibrações auto excitadas). Este fato pode ter ocorrido pela distância entre a frequência natural do sistema e a harmônica excitada para o comprimento de balanço da ferramenta de 30 mm e 45 mm (5ª e 3ª harmônicas, respectivamente).

Neste caso, a energia reduzida associada a estas harmônicas não é suficiente para excitar a estrutura e para que seus efeitos sejam dominantes. Por outro lado, a vibração forçada gerada pela excitação da ferramenta em uma frequência

próxima das harmônicas de sua frequência natural pode contribuir para a vibração total e assim gerar os altos valores de rugosidade obtidos. Com isso, não é possível afirmar para esta faixa de comprimentos de balanço que alterações na frequência de excitação da ferramenta de $\pm 10\%$ melhorem a qualidade da superfície obtida, visto a dominância do fenômeno de vibração auto excitada.

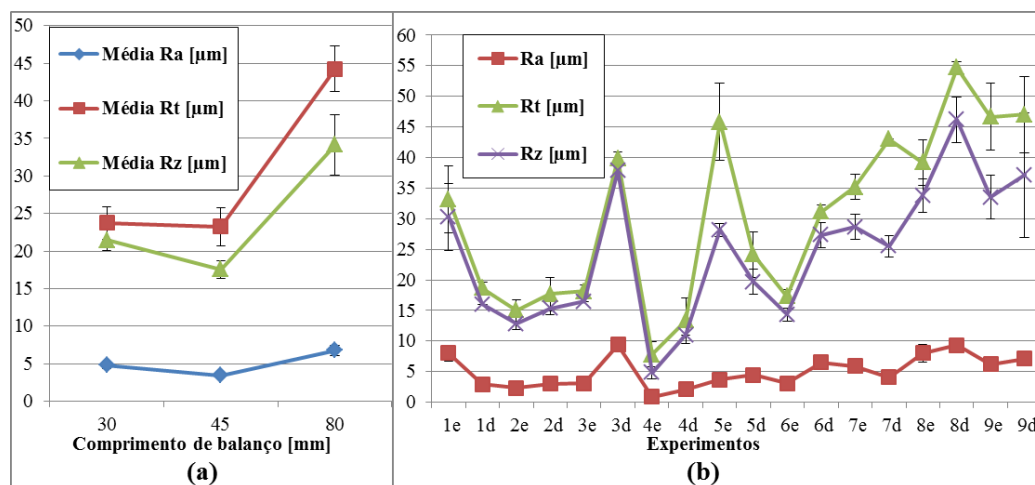


Figura 2. Resultados de rugosidade obtidos nos experimentos: valores médios (a) e discretos (b).

Quanto aos experimentos com a condição menos rígida (comprimento de balanço de 80 mm), a excitação do sistema em uma faixa em torno da frequência natural da ferramenta resulta em um corte altamente instável. Isto é verificado pelos altos valores de rugosidade nos experimentos 7 ao 9 (Tabela 1), bem como as variações em seus valores (Figura 2). Este fato é ainda mais crítico para frequências de excitação iguais ou superiores à frequência natural da ferramenta. Neste caso, alterar o valor da frequência de excitação em $\pm 10\%$ não é suficiente para estabilizar o processo dado os resultados de rugosidade (Figura 2). Visto isso, há um valor intermediário do comprimento de balanço entre 45 mm e 80 mm onde a vibração forçada passa a exercer maior influência na oscilação da ferramenta.

De modo geral, as vibrações observadas nos experimentos foram severas e resultaram em uma qualidade da superfície inadequada para a peça resultante do processo. É possível observar em todos os experimentos os efeitos da baixa velocidade de corte na região central da ferramenta (Figura 1). Neste caso, o material sofre deformação plástica ao invés de cisalhamento, o que prejudica a qualidade da superfície obtida. Porém, foi constatado que um aumento na velocidade de corte reduz esses efeitos e os danos ocasionados pela mesma (SOUZA et al., 2014a). Os efeitos deste fenômeno podem ser observados para o comprimento de balanço de 30 mm. Com o aumento da velocidade de corte (experimento 1 $\Rightarrow$ 3 $\Rightarrow$ 2) nota-se a redução da região com material deformado, fato não observado para os demais comprimentos de balanço da ferramenta (Figura 1).

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho as principais conclusões são apresentadas a seguir:

- Para valores reduzidos de comprimento de balanço da ferramenta (30 mm e 45 mm), a vibração forçada gerada pelas harmônicas excitadas (5ª e 3ª) não foram determinantes nos resultados de rugosidade da peça mas atuaram de forma conjunta com a vibração auto excitada. Neste caso, não é possível afirmar que alterações de $\pm 10\%$ da frequência de excitação em relação à natural da ferramenta melhorem os resultados obtidos. Além disso, os resultados obtidos com o comprimento de balanço superior (45 mm) podem ser mais satisfatórios em comparação com o comprimento de balanço inferior (30 mm) em alguns casos.
- Para o maior comprimento de balanço da ferramenta (80 mm), a excitação da ferramenta em uma faixa em torno de sua frequência natural provoca grande instabilidade no corte e gera rugosidades elevadas na peça. Neste caso, alterar o valor da frequência de excitação em $\pm 10\%$ não é suficiente para estabilizar o processo. Além disso, há um valor intermediário do comprimento de balanço entre 45 mm e 80 mm onde a vibração forçada passa a ser determinante nos resultados de rugosidade da peça.
- Para condições com maior rigidez, o corte mais estável propicia que o aumento da velocidade de corte reduza a área com deformação plástica de material.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa e às empresas Villares Metals, KC Ferramentas e Tecnodrill.

6. REFERÊNCIAS

- Aguilar, M.M., Diniz, A.E. e Pederiva R., 2013. “Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools”. In *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, p. 1-10.
- Albertelli P., Mussi V. e Monno M., 2014. “The analysis of tool life and wear mechanisms in spindle speed variation machining”. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1051-1061.
- Fiorentin, T. A., Lopes, L. F. ; Silva Junior, O. M., e Lenzi, A., 2016 . Vibroacoustic Models of Air-Core Reactors. *International Journal of Acoustics and Vibration*, v. 21, p. 453-461.
- Gao, S.H. e Meng, G., 2011. “Research of the spindle overhang and bearing span on the system milling stability”. In *Archive of Applied Mechanics*, p. 1473-1486.
- Oliveira, A., Fiorentin, T. A., Silva, M.G., 2008. Design of System and Components - NVH view - Test and Simulation. *SAE Technical Paper Series*, v. 2008, p. 2008-36-0239.
- Polli M.L., 2005. *Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Song Q., Ju G., Liu Z. e Ai X., 2014. “Subdivision of chatter-free regions and optimal cutting parameters based on vibration frequencies for peripheral milling process”. In *International Journal of Mechanical Sciences*, p. 172-183.
- Souza, A. F., Diniz, A. E., Rodrigues, A. R. e Coelho, R. T., 2014. “Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, n. 9–12, p. 1565–1577.
- Totis G., Albertelli P., Sortino M. e Monno M., 2014. “Efficient evaluation of process stability in milling with Spindle Speed Variation by using the Chebyshev Collocation Method”. In *Journal of Sound and Vibration*, p. 646-668.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF FORCED VIBRATION IN SURFACE QUALITY FOR DIFFERENT OVERHANGS ON MILLING PROCESS

Lucas Gomes Camargo

Federal University of Santa Catarina - Rua Lauro Linhares, 1850 - Trindade, Florianópolis – SC.
lucas.g.c@posgrad.ufsc.br

Adriano Fagali de Souza

Federal University of Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
adriano.fagali@ufsc.br

Thiago Antonio Fiorentin

Federal University of Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
thiago.antonio@ufsc.br

Lucas André Moreira

Federal University of Santa Catarina - Campus Joinville - R. Dona Francisca, 8300 - Distrito Industrial, Joinville – SC.
lucasandremoreira2010@gmail.com

Abstract. The vibration during the milling process results in improper surface quality and loss of dimensional accuracy of the part. Forced vibration can be induced by the excitation of the tool at its natural frequency during cutting. This natural frequency is a function of its balance length, where its increase reduces the natural frequency and facilitates its excitation by the action of the edge in the material. In this case, changing the excitation frequency to not match the natural frequency of the tool is an option. In this context, the present work investigates the variation of surface quality obtained when the excitation of the tool is close to or coincident with its natural frequency. Different balance lengths were considered in obtaining the natural frequency. The results indicate that for reduced values of the overhang forced vibration is not dominant in the vibrational phenomenon but contributes to the loss of surface quality. On the other hand, for higher values of overhang the forced vibration makes the cut highly unstable for a range of $\pm 10\%$ around the natural frequency, which results in a great loss of surface quality.

Keywords: Milling. Forced vibration. Overhang. Natural frequency. Surface quality.

RESPONSIBILITY NOTICE

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