

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO DE EXCITAÇÃO APLICADO EM TESTES MODAIS EXPERIMENTAIS

Saulo Melotti

Joel Martins Crichigno Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Tecnológicas - Rua Paulo Malschitzki, 200 Zona Industrial Norte, Joinville / SC - CEP: 89.219-710
saulo.melotti@yahoo.com.br
joel.crichigno@udesc.br

Douglas Negri

Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser - Rua Arno Waldemar Dohler, 308 - Santo Antonio 89.218-153 - Joinville - SC
douglas.negri@sc.senai.br

Resumo. Quando não controladas, vibrações mecânicas são extremamente prejudiciais nos processos de usinagem, pois afetam diretamente a vida da ferramenta e a qualidade da peça usinada. Em se tratando dos processos em microescala, o impacto deste fenômeno é ainda mais prejudicial decorrente da fragilidade das microferramentas e dos requisitos de alta precisão dos microcomponentes. Para auxiliar a eliminar e/ou minimizar o problema de vibração durante a usinagem, a caracterização dinâmica do sistema apresenta-se como alternativa. O presente trabalho destaca o estudo para caracterizar o funcionamento de um mecanismo de excitação automatizado concebido para realizar análise modal experimental em sistemas de microfresamento. Foram avaliadas as influências da massa e rigidez do martelo e material e forma das ponteiros na largura de banda excitada, repetibilidade do ponto excitado e controle da força de excitação. Importantes conclusões foram obtidas acerca da influência destas variáveis no funcionamento do mecanismo. A repetibilidade do sistema de excitação foi considerada satisfatória, visto que para o total de nove impulsos, o desvio padrão observado na intensidade do sinal foi de 0,198N sem diferença significativa no tempo dos impulsos e no local do ponto excitado. A largura de banda excitada pelo mecanismo de excitação foi de 4,7kHz.

Palavras chave: Análise modal experimental. Mecanismo de excitação. Repetibilidade do ponto excitado.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de microfabricação por corte de material o microfresamento destaca-se em função da maior velocidade, economia e flexibilidade para fabricação de formas 3D e capacidade para trabalhar com diversos tipos de materiais de engenharia: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos (AFAZOV et al., 2013; BOSWELL; ISLAM; DAVIES, 2018; EHMANN; BOURELL; CULPEPPER, 2005).

No microfresamento, a vibração é extremamente crítica, uma vez que a ferramenta é frágil e as micropeças exigem alta precisão geométrica, dimensional e acabamento superficial.

Uma alternativa para evitar as vibrações é, com base na resposta dinâmica do sistema e das características do material da peça, determinar o diagrama de estabilidade (lóbulo de estabilidade) do sistema e especificar parâmetros de corte mais adequados para o processo de microfresamento (CHENG, 2009; DUNWOODY, 2010; LAKSHMI; VASU; RAO, 2008). No entanto, segundo Park, Altintas e Movahhedy (2003), a determinação de condições estáveis de microusinagem ainda é desafiadora, pois exige a medição correta da função resposta em frequência (FRF – *Frequency Response Function*) na ponta da ferramenta acoplada ao conjunto eixo árvore – porta ferramentas.

A análise modal experimental é aplicada na avaliação do desempenho dinâmico e eficácia de microestruturas, bem como na extração de parâmetros modais para confirmar e calibrar modelos analíticos e numéricos. A importância deste procedimento está no fato dos sistemas dinâmicos terem seu desempenho governado pelos parâmetros modais (XIONG et al., 2015; CHOU; WANG, 2001).

Em função da dimensão, quantidade de massa e fragilidade das microestruturas, os instrumentos usados nos testes modais de macroestruturas são, muitas vezes, incompatíveis com os microcomponentes, o que torna este tipo de análise modal experimental um desafio (CHOU; WANG, 2001; OZDOGANLAR; HANSCHKE; CARNE, 2005; XIONG et al., 2015). As limitações construtivas dos dispositivos de captura usados nos testes modais convencionais impossibilitam atingir a largura de banda necessária, assim como seu tamanho desproporcional impede o uso em microanálises.

Quando comparadas com estruturas comuns, as microestruturas possuem frequências naturais muito altas e pequenos deslocamentos elásticos (CHOU; WANG, 2001). Assim, a excitação é o principal desafio do teste modal de microestruturas uma vez que, as características da excitação influenciam fortemente os resultados do teste modal (XIONG

et al., 2015). Segundo Chou e Wang (2001), o método de excitação é vital para o teste modal. Um dispositivo qualificado deve ter a capacidade de excitar todos os modos de interesse. O controle da força de excitação é necessário para evitar danificar as microferramentas e a repetibilidade do local excitado garante maior confiabilidade do resultado obtido.

Diante do exposto acima, o presente trabalho apresenta o estudo de caracterização do funcionamento de um mecanismo de excitação automatizado, concebido para realizar análise modal experimental em sistemas de microfresamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os equipamentos utilizados no procedimento experimental de caracterização do funcionamento do mecanismo de excitação foram: mecanismo de excitação composto por um eletroímã e um minissensor de força modelo PCB209C01 e sistema de controle para disparo e travamento do martelo de impacto após o impulso, e osciloscópio ICEL, modelo OS-5022C para fazer a aquisição do sinal do impulso. Os testes para verificação da repetibilidade do ponto excitado e mapeamento da força de excitação foram realizados no centro de fresamento HERMLE C42 U e os demais testes realizados no centro de microfresamento KERN Pyramid Nano. O software Scilab 6.0.1 foi utilizado para processar os dados.

2.1. TESTE PARA AVALIAR A REPETIBILIDADE DO PONTO EXCITADO E FORÇA DE EXCITAÇÃO

A Figura 1a mostra a montagem do experimento para avaliar tanto a repetibilidade do ponto excitado como a força de excitação. Para visualizar o local atingido pelo martelo de impacto durante o teste de repetibilidade de ponto, a superfície do alvo foi coberta com uma fina camada de pó branco. Como a adesão do pó à superfície do alvo é baixa, a camada de pó na região de contato entre martelo e alvo era removida no momento do impulso. No total, dez impulsos foram realizados sem que as posições do alvo e do martelo fossem alteradas. Para todos os impulsos a forma e intensidade foram capturados com o auxílio do osciloscópio.

De acordo com a teoria do contato de Hetz, a força de excitação é consequência da deformação de contato entre os corpos. Portanto, para todos os ensaios, a força de excitação foi ajustada pela variação da distância entre martelo e alvo.

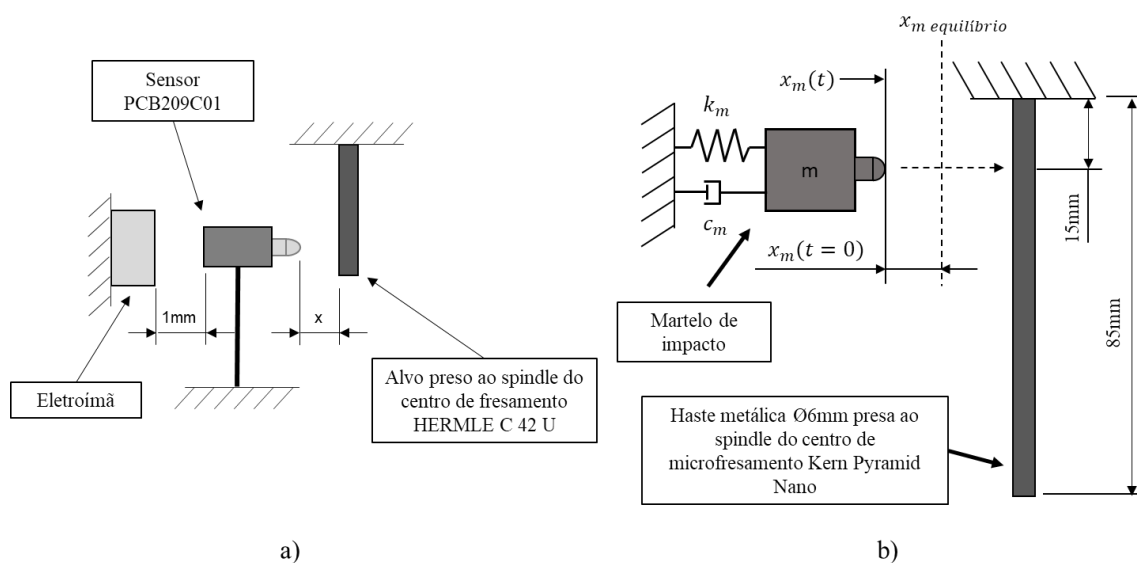


Figura 1. a) Disposição do mecanismo de excitação e alvo durante os testes para avaliar a repetibilidade de ponto e força de excitação e b) Teste para análise da influência da massa, rigidez e material das ponteiros no tempo de contato durante a excitação.

2.2. TESTE PARA AVALIAR A INFLUÊNCIA DA MASSA E DA RIGIDEZ DO MECANISMO DE EXCITAÇÃO E DO MATERIAL DAS PONTEIRAS NO TEMPO DE CONTATO ENTRE MARTELO E ALVO

Visto que as frequências das microferramentas são da ordem de kHz, quanto menor o tempo de contato durante a excitação, maior será a largura de banda que o martelo consegue excitar. O mecanismo de excitação nada mais é do que um sistema massa – mola – amortecedor de um grau de liberdade. Assim, o estudo das influências da rigidez e da massa no tempo de contato durante a excitação foi realizado para determinar a melhor configuração massa – rigidez para varrer a maior banda de frequência possível.

Dois testes foram realizados, um variando a massa do martelo e no outro a rigidez. Nesta etapa, os testes foram realizados no centro de microfresamento KERN Pyramid Nano. Uma haste de aço 1045 de 6mm de diâmetro foi fixada no eixo-árvore da máquina e o martelo posicionado segundo o esquema mostrado na Figura 1b. Os impactos foram realizados 15mm do ponto de engaste da haste. Para cada modificação da massa e/ou rigidez do martelo, três impulsos foram medidos. A influência da massa do martelo foi verificada para quatro condições: massa original do martelo, adição de 2,3975g, adição de 4,5199g e adição de 7,4081g. A influência da rigidez foi verificada para três valores diferentes de rigidez teórica (valor calculado): 333,248kN/m, 650,875kN/m e 2665,984kN/m.

Visto que no martelo de impacto convencional o material da ponteira também influencia a largura de banda excitada, três materiais (metal duro, alumínio e nylon) foram testados como ponteiras no martelo automatizado. Assim como nos testes anteriores, foram realizados três impulsos para cada material da ponteira.

2.3. DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE BANDA EXCITADA PELO MARTELO DE IMPACTO AUTOMATIZADO

Após caracterizar o funcionamento do mecanismo de excitação e determinar a influência de fatores construtivos e do material da ponteira no tempo de contato durante a excitação, a largura de banda excitada, ou seja, o autoespectro do impulso foi obtido com o sistema comercial da Bruel & Kjaer composto pelo módulo de aquisição de dados Type 3160-A-042 e o software PULSE LabShop Fast Track versão 16.1.1. A taxa de aquisição utilizada foi de 16384Hz em um intervalo de tempo de 1 segundo. A disposição do aparato experimental utilizado na determinação do autoespectro do martelo foi muito semelhante à da Figura 1b, no entanto no lugar da haste de 6mm de diâmetro foi utilizada uma haste de aço H13 temperado de 3mm de diâmetro com 30mm em balanço. A adoção da haste de material temperado com menor comprimento em balanço é justificada por sua maior semelhança com as microferramentas.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da análise da repetibilidade do ponto excitado são mostrados na Figura 2. Pode-se observar em 2a que o primeiro impulso (I1) tem menor amplitude e maior largura de base em relação aos outros nove impulsos (I2 ao I10). Este comportamento é decorrente da influência da camada de pó depositada sobre a superfície do alvo. Os nove impulsos subsequentes possuem a mesma forma e apresentam pouquíssima variação no valor da amplitude, o que nos permite afirmar que todos os impulsos foram realizados no mesmo ponto, pois uma vez removida a camada de pó da região de contato os impulsos apresentaram a mesma forma e intensidade.

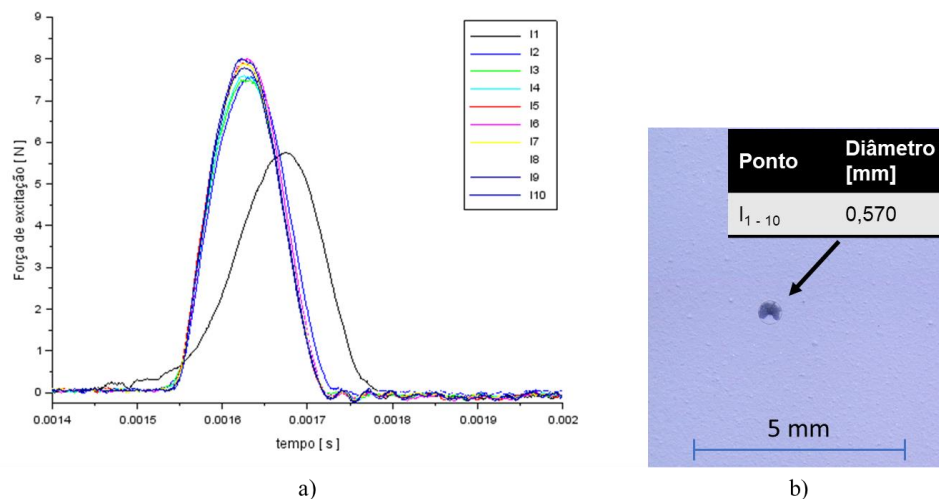


Figura 2. a) Impulsos realizados e b) Imagem do ponto excitado dez vezes.

A imagem do ponto excitado (Figura 2b), é mais uma evidência da capacidade que o mecanismo de excitação tem para acertar sempre o mesmo local. Verifica-se ainda que a força de excitação também é bem controlada e tende a ser repetitiva uma vez que, a força média é de 7,81N com desvio padrão de 0,198N, desconsiderando o primeiro impulso.

Na Figura 3 são apresentados os resultados das análises da influência da massa e da rigidez do martelo no tempo de contato de excitação. Tomando a frequência como o inverso do período, a largura de banda nos gráficos da Figura 3 é apenas uma referência para verificar como as grandezas investigadas afetam o tempo de contato (largura da base do impulso).

É observado uma influência muito mais significativa da massa do que da rigidez, ou seja, o tempo de contato é mais sensível à massa do martelo do que à rigidez. Como já descrito anteriormente, o mecanismo de excitação é um sistema massa-mola-amortecedor, em que a massa é responsável pela força de inércia do sistema, a mola pela força potencial e o amortecedor pela dissipação de energia. Se perturbarmos o martelo e deixamos este oscilar, veremos que a vibração será próxima da frequência natural do sistema, dada pela raiz quadrada do quociente da rigidez pela massa. Logo, reduzindo a massa, aumentamos a frequência natural do sistema. O mecanismo de excitação foi projetado para que o impulso ocorresse na metade de uma oscilação do martelo, ou seja, na mudança de sentido do movimento, portanto quanto menor for a massa do martelo, menor será o tempo de contato com o alvo, já que menos energia terá que ser gasta para mudar o sentido do movimento. O mesmo comportamento deveria ocorrer para o aumento da rigidez, já que com um aumentando significativo, a força de inércia tende a ser mínima perante a força potencial da mola. Porém, com base no gráfico da Figura 3b, pouquíssima variação na largura de banda com o aumento da rigidez do martelo foi observada.

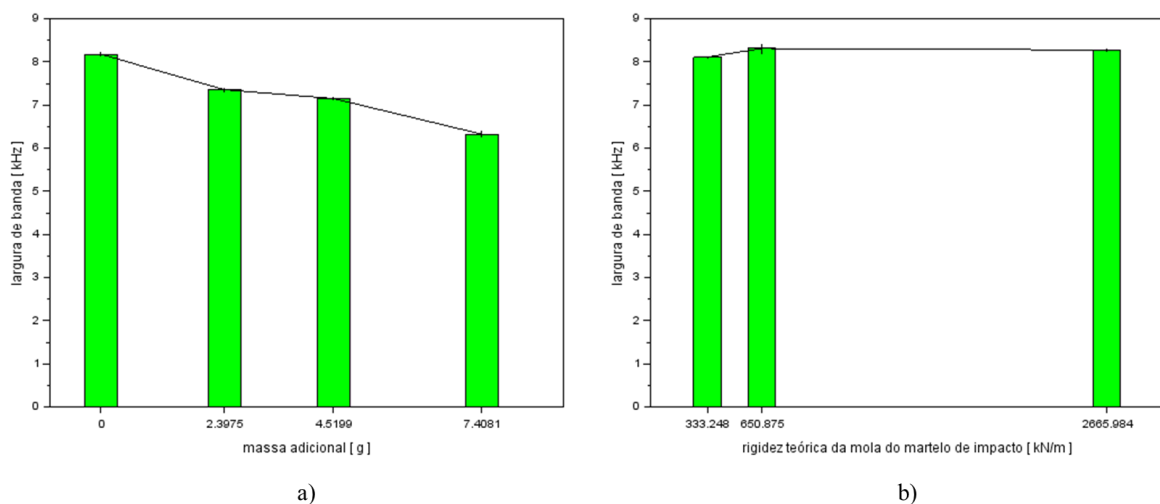


Figura 3. a) Variação da largura de banda com a massa do martelo e b) Variação da largura de banda com a rigidez do martelo

Na Figura 4 é apresentado o resultado para a influência do material da ponteira na largura de banda excitada. Diante do gráfico da Figura 4a, percebe-se nitidamente a diferença na forma e na largura dos impulsos com a dureza do material que se está utilizando para colidir com o alvo. É visível que quanto maior a dureza, menor o tempo de contato e maior a banda varrida. Vale ressaltar que a amplitude dos impulsos não é um parâmetro para diferenciar as curvas, pois a distância entre martelo e alvo precisou ser ajustada para cada material, de modo que o impulso pudesse ser capturado.

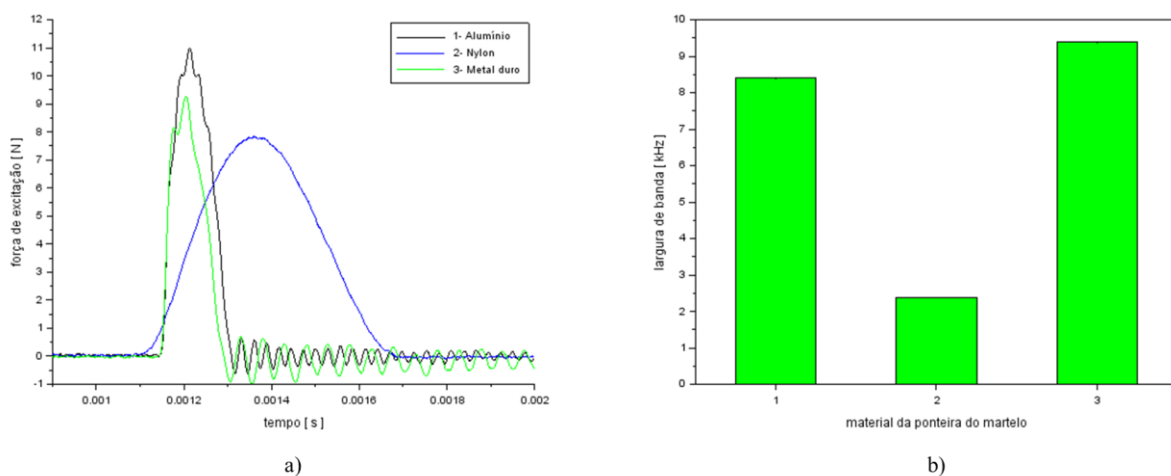


Figura 4. a) Impulsos e b) Largura de banda excitada em função do material da ponteira.

Devido a grande repetibilidade da forma e intensidade dos impulsos, a barra de erros é praticamente imperceptível na Figura 4b.

Por fim, a Figura 5 apresenta a largura de banda excitada pelo martelo de impacto munido da ponteira de alumínio.

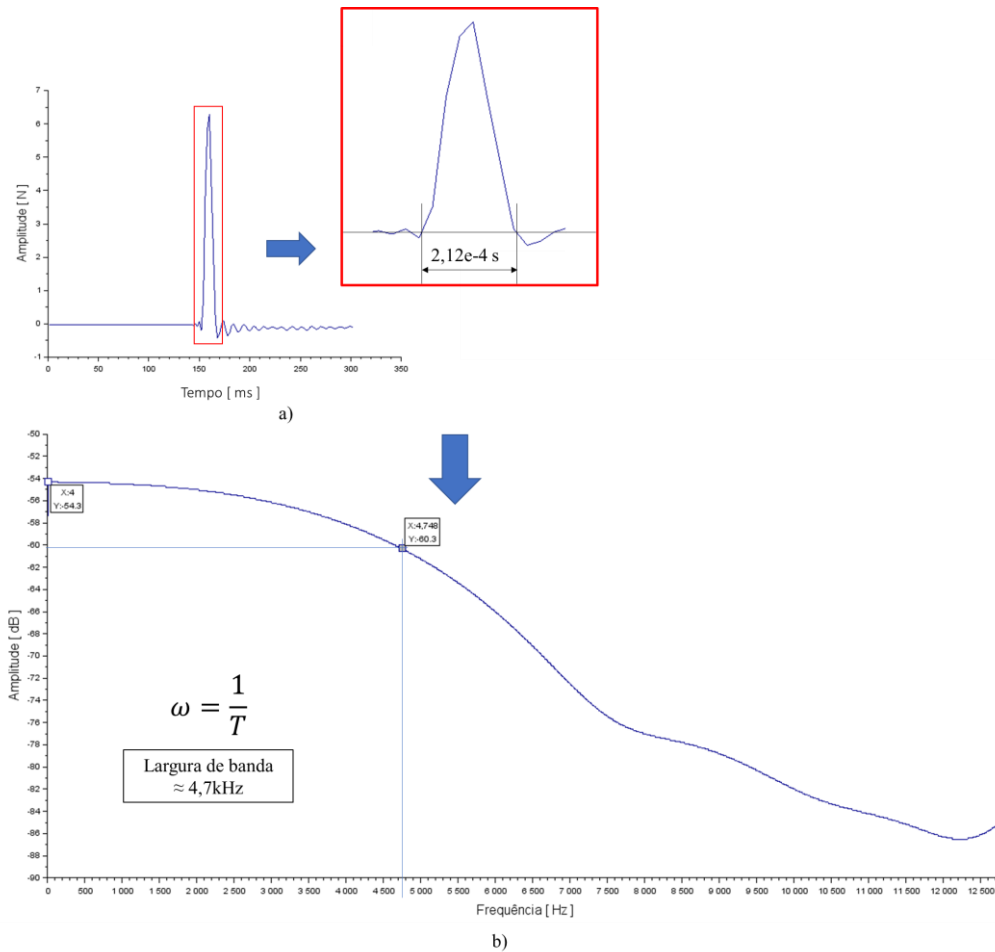


Figura 5. Largura de banda excitada pelo martelo de impacto automatizado.

A Figura 5b apresenta a faixa útil da largura de banda excitada pelo martelo com o decaimento admissível de 6dB já considerado.

4. CONCLUSÕES

Diante das análises realizadas para caracterizar o funcionamento do mecanismo de excitação automatizado e verificar a repetibilidade e largura de banda que este consegue excitar, os seguintes resultados são elencados:

A média das amplitudes máximas da força de excitação para 9 impulsos, desconsiderando o impulso afetado pela camada de pó, foi de 7,81N com desvio padrão de 0,198N. Além da grande repetibilidade na intensidade da força de excitação, não foi observada alteração no local do ponto excitado;

Observou-se que a massa do martelo de impacto é a principal variável que influencia o tempo de contato de excitação, ou seja, a duração do impulso;

A dureza do material da ponteira tem grande influência na forma do impulso. Observou-se que quanto maior a dureza, menor o tempo de contato e maior a largura de banda varrida.

A automatização do martelo de impacto permitiu impulsos com curta duração de tempo, cerca de 212 ms e uma largura de banda de 4,7kHz, utilizando a ponteira de alumínio. De acordo com a pesquisa realizada na literatura, a largura de banda alcançada é suficiente para excitar as frequências de interesse do sistema de microfresamento.

Pelos resultados obtidos, é possível afirmar que o mecanismo de excitação automatizado possibilita maior precisão para excitar microestruturas e varrer uma maior banda de frequências. A maior precisão é atribuída a menor influência do operador no procedimento experimental.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as instituições UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina pela infraestrutura e recursos proporcionados para ampliar os conhecimentos na área de vibrações mecânicas e processos de usinagem e aos Institutos SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser pelo espaço e infraestrutura cedidos para realização dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS

- AFAZOV, S. M. et al. *Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability*. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 213, n. 5, p. 671–684, 2013.
- BEDIZ, B.; KORKMAZ, E.; BURAK OZDOGANLAR, O. *An impact excitation system for repeatable, high-bandwidth modal testing of miniature structures*. *Journal of Sound and Vibration*, v. 333, n. 13, p. 2743–2761, 2014.
- BOSWELL, B.; ISLAM, M. N.; DAVIES, I. J. *A review of micro-mechanical cutting*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 1–4, p. 789–806, 2018.
- CHENG, K. (ED.). *Machining Dynamics*. London: Springer London, 2009.
- CHOU, Y.-F.; WANG, L.-C. *On the Modal Testing of Microstructures: Its Theoretical Approach and Experimental Setup*. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 123, n. 1, p. 104, 2001.
- DUNWOODY, K. *Automated identification of cutting force coefficients and tool dynamics on CNC machines*. n. March, 2010.
- EHMANN, K.; BOURELL, D.; CULPEPPER, M. *International assessment of research and development in micromanufacturing*. 2005.
- LAKSHMI, L. S.; VASU, V.; RAO, B. N. *Analytical prediction of stability lobes in high-speed milling and their application to micromilling* Prasad Krishna. v. 13, p. 2008, 2008.
- OZDOGANLAR, O. B.; HANSCHKE, B. D.; CARNE, T. G. *Experimental modal analysis for microelectromechanical systems*. *Experimental Mechanics*, v. 45, n. 6, p. 498–506, 2005.
- PARK, S. S.; ALTINTAS, Y.; MOVAHHEDY, M. *Receptance coupling for end mills*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 9, p. 889–896, 2003.
- XIONG, L. et al. *New laser excitation method for modal analysis of microstructure*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 50–51, p. 227–234, 2015.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF AN EXCITATION MECHANISM APPLIED IN EXPERIMENTAL MODAL TESTS

Saulo Melotti

Joel Martins Crichigno Filho

University of the State of Santa Catarina – Center of Technological Sciences - Rua Paulo Malschitzki, 200 Zona Industrial Norte, Joinville / SC - CEP: 89.219-710
saulo.melotti@yahoo.com.br
joel.crichigno@udesc.br

Douglas Negri

SENAI Innovation Institute in Manufacturing Systems and Laser Processing - Rua Arno Waldemar Dohler, 308 - Santo Antonio 89.218-153 - Joinville - SC
douglas.negri@sc.senai.br

Abstract. When not controlled, mechanical vibrations are extremely damaging in machining processes as they directly affect the life of the tool and the quality of the machined part. When dealing with micro-scale processes, the impact of this phenomenon is even more detrimental due to the fragility of the micro-tools and the high precision requirements of the microcomponents. To help eliminate and / or minimize the vibration problem during machining, the dynamic characterization of the system is presented as an alternative. The present work presents the repeatability analysis of the excitation system of a device to assist in the dynamic characterization of microfreshing systems. The influences of the mass and rigidity of the hammer and material and shape of the tips on the excited bandwidth, the repeatability of the excited point and the control of the excitation force were evaluated. Significant conclusions were drawn about the influence of these variables on the functioning of the mechanism. The repeatability of the excitation system was considered satisfactory, since for the total of nine pulses, the standard deviation observed in the intensity of the signal was of 0.198N without significant difference in the time of the impulses and in the place of the excited point. The bandwidth excited by the excitation mechanism was 4.7kHz.

Keywords: Experimental modal test. Excitement. Repeatability.

RESPONSIBILITY NOTICE

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