



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DA TRAJETÓRIA DE USINAGEM NA QUALIDADE DE GEOMETRIAS OBTIDAS DURANTE O MICROFRESAMENTO

Andrés Guillermo Guasca González, agguasca@gmail.com¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627

Resumo: Hoje em dia nas operações de alta velocidade de corte (HSM) tão importante quanto os parâmetros de corte são também as trajetórias de usinagem da ferramenta. Isto devido a sua influencia nos desvios geométricos, na precisão dimensional das peças e seu acabamento superficial. No caso da fabricação de paredes esbeltas em condições de alta taxa de remoção, problemas do tipo estático como os devido a esforços de usinagem e dinâmicos como as vibrações auto-excitadas (chatter) podem aparecer. Por outro lado, a operação de microfresamento se apresenta como uma alternativa de fabricação de peças ou estruturas de pequeno tamanho e alta precisão dimensional, e ao mesmo tempo com alta resistência mecânica e propriedades magnéticas e térmicas, importantes para as indústrias aeroespaciais, aeronáuticas, biomédica, militar, entre outras, em materiais diversos como ligas de titânio, níquel, cobre entre outros. Além de isso, nos processos de micro usinagem, os mecanismos de remoção de material são modificados pelo “efeito de escala” que influencia, por exemplo, na espessura mínima de cavaco. Este trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos de diferentes trajetórias da ferramenta e da espessura crítica de usinagem durante o microfresamento com alta velocidade de corte de paredes esbeltas, analisando sua influencia nas características geométricas e no acabamento superficial do componente. Os resultados mostram que para este tipo de usinagem a escolha adequada tanto dos parâmetros de corte como das trajetórias da ferramenta de corte tem um importante papel no objetivo de alcançar precisão de forma e acabamento superficial superior.

Palavras-chave: Microfresamento, Alumínio, HSM, acabamento superficial.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas têm muitas aplicações na indústria do automóvel e aeroespacial por suas boas propriedades mecânicas e seu baixo peso. Por isso, a usinagem das diferentes ligas com diferentes materiais da ferramenta tem muitas pesquisas desenvolvidas. Thamban, et al. (2013) tem avaliações das forças de corte na usinagem da liga de alumínio 6061-T6 com ferramentas de corte de carboneto de tungstênio sendo uma com recobrimento de diamante por deposição química de vapor (CVD) e encontraram valores de força na direção do avanço menores para a ferramenta com recobrimento. Alberti, et al. (2005) desenvolveram uma pesquisa de usinagem pela alta velocidade onde se avaliou o planejamento do processo de remoção de metal e desenvolvendo um método pela seleção dos melhores parâmetros de corte obtendo tempos de fabricação mais baixos e com a segurança de condições de acabamento ótimas. SILLER, et al., (2006) propuseram um modelo mecanicista baseado na distribuição da frequência do deslocamento da interpolação lineal da trajetória num programa de CNC e a caracterização da máquina-ferramenta para grandes e pequenas mudanças na direção dela trajetória da ferramenta, esse modelo foi testado na fabricação de superfícies esculpidas em alumínio e tinha um erro máximo de 5-22%. Alberti, et al., (2004) avaliaram a influência da velocidade do avanço, o tipo de interpolação e o porta ferramentas na precisão dimensional do produto feito numa liga de alumínio e o tempo de usinagem, eles apresentaram que o porta ferramenta tinha uma influência muito grande na precisão dimensional e que o tipo de interpolação sensivelmente afetou o tempo de usinagem. Monreal, et al., (2003) se concentraram no desenvolvimento de cavidades com uma trajetória de ferramenta tipo “zig-zag” e quantificaram as diferenças entre o avanço do programa e do usinagem, também propuseram um modelo pela avaliação do tempo de usinagem baseado na medição experimental das acelerações da máquina-ferramenta. Koike, et al., (2013) apresentaram um método pela redução das vibrações da peça de trabalho no ponto de corte, o algoritmo gera uma trajetória de corte que minimiza os deslocamento da peça de trabalho. A trajetória gerada pelo algoritmo é baseada nas relações entre os vetores das forças

de corte, as direções dos avanços e a orientação da ferramenta. De Oliveira-Leite, et al., (2014) estudaram a influência na geometria e o acabamento superficial de três trajetórias de corte sugeridas pelo software de CAM na fabricação de uma peça por meio de redes neurais artificiais a fim de identificar e corrigir os desvios que possam ocorrer na peça usinada em relação à peça desenhada. Smith, et al., (1997) pesquisaram e desenvolveram um método com sucesso para fresamento de alta velocidade de peças de alumínio com costelas longas, finas e flexíveis. Shamsuddin, et al., (2013) apresentaram uma comparação entre os diferentes caminhos de corte para o usinagem de ligas de alumínio de paredes finas que procuram o caminho mais eficiente. Eles avaliaram o acabamento superficial, a precisão dimensional e tempo de usinagem, as trajetórias foram geradas pelo software CAM e determinaram que uma estratégia teve bons resultados em termos de precisão dimensional e tempo de usinagem mas não foi a melhor em acabamento superficial.

No micro fresamento um dos parâmetros mais importantes é o avanço pela aresta de corte da ferramenta. Câmara, (2014) definiu trabalhar com o modelo apresentado na Eq. (1), devido à maior exatidão das medições do coeficiente de atrito e do raio da aresta de corte em comparação com os dados de força de usinagem e o dinamômetro apresentava baixa sensibilidade a altas frequências presentes no microfresamento.

$$h_c = \rho \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (1)$$

Onde h_c é a espessura crítica do material não deformado, ρ é o raio da aresta de corte e β é o ângulo de atrito entre a ferramenta e o material da peça.

Se planejam fazer sobre o corpo de prova unos canais de 1 mm de largura (o mesmo diâmetro da ferramenta) com uma distância de separação de 8 mm entre eles. Depois com a mesma ferramenta e entre os dois canais planeja-se um canal de 6 mm de largura com o fim de obter uma espessura de parede de 1mm entre os canais. Foi usado o software NX9, o módulo de CAM, gerando um código ISO cuja trajetória escolhida foi “seguir a periferia” para usinar os canais de 1 mm de comprimento. Nesta opção a ferramenta sempre corta de forma discordante na parede esquerda do canal e concordante na parede direita. Figura 1 mostra em azul a trajetória seguida pela ferramenta para fazer a usinagem.

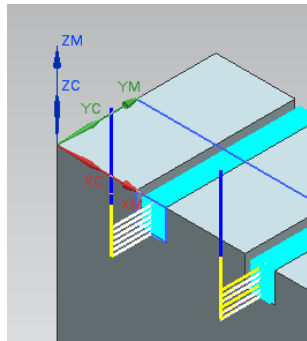


Figura 1. Trajetórias de usinagem na preparação do corpo de prova.

Enquanto o canal com largura de 6 mm propõem-se três trajetórias de usinagem diferentes, a primeira delas foi desenhada pelos autores e se mostra na Fig. 2 (em verde a trajetória do avanço da ferramenta).

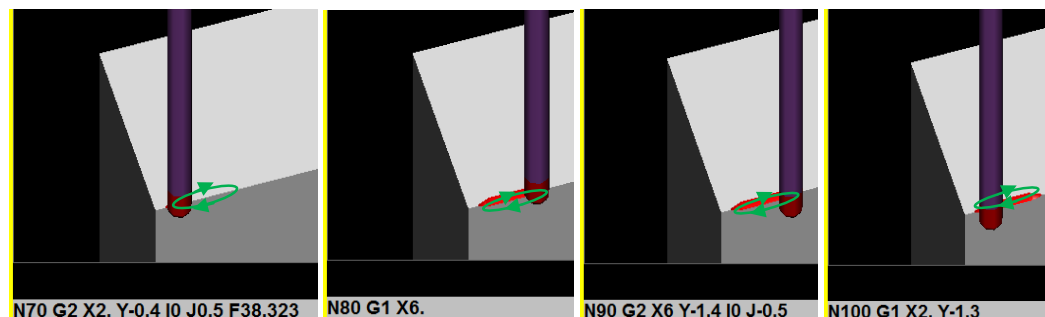


Figura 2. Trajetória de corte mostra-se de esquerda à direita o início da usinagem.

Com essa trajetória procura-se que a ferramenta tem uma passagem através da parede da costela, muito mais “macio”. Para isso a entrada e saída da ferramenta é uma trajetória de meia circunferência, e são tangentes à parede da costela.

Na seguinte figura pode-se observar a outra trajetória proposta (em preto a trajetória do avanço da ferramenta), gerada pelo software de CAM cujo nome é “trocoidal” e com trajetórias circulares faz a usinagem das paredes, em seguida faz uma trajetória em linha por a periferia da parede e depois finaliza o interior dos canais.

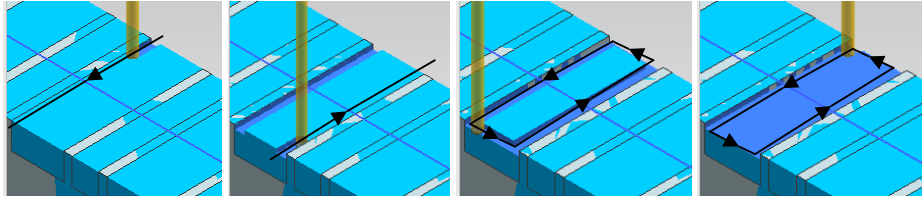


Figura 3. Trajetória “trocoidal” mostra-se de esquerda à direita as etapas de usinagem.

A última trajetória proposta também é gerada pelo software de CAM com a opção “zig com contorno” e na Fig. 4 se apresenta a sequência do corte que faz a ferramenta, com uma entrada e uma saída tangente às paredes das costelas, mas com um deslocamento em linha reta (novamente, em preto a trajetória do avanço da ferramenta).

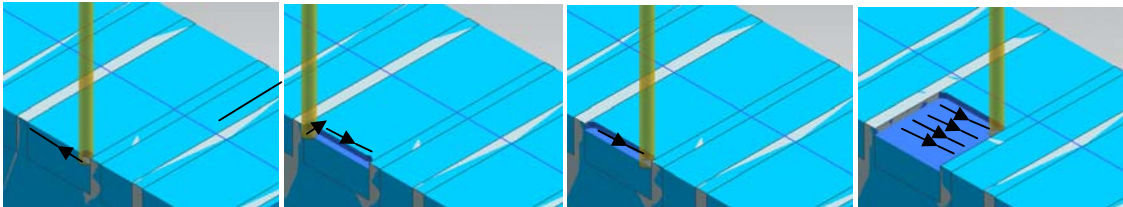


Figura 4. Trajetória “zig com contorno” mostra-se de esquerda à direita a sequência de usinagem.

Neste trabalho se apresenta os resultados preliminares de um estudo que pretende avaliar os efeitos de diferentes trajetórias da ferramenta no fresamento de acabamento na fabricação de geometrias simples, analisando sua influencia nas características geométricas, o acabamento superficial e do desgaste de ferramenta quando do uso altas velocidades do cabeçote ou eixo principal (40.000 RPM). Para isso escolhe-se a trajetória de usinagem projetada pelos autores.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Determinação dos parâmetros de usinagem

É necessário determinar o coeficiente de atrito entre o material da ferramenta e a liga de alumínio 6262-T6, por conseguinte, deve ser feito um teste no tribômetro onde a velocidade de deslizamento e a força normal são os dados de entrada. De acordo com Câmara, (2014) a força na direção do avanço é menor que 0,8 N para um avanço de 0,250 μm por aresta de corte e uma profundidade de 30 μm . É menor que 2,4 N com um avanço por aresta de 0,500 μm e uma profundidade de 30 μm . A velocidade de deslizamento com o qual foram realizados os testes foi de até 63 m/min e que a carga normal do teste de pino sobre disco é três vezes o valor da força na direção do avanço.

De uma barra redonda de alumínio 6262-T6 de diâmetro 78,5 mm, foi obtido uma seção de aproximadamente 15 mm de espessura. Depois, suas duas superfícies circulares foram usinadas num centro de usinagem CNC ROMI modelo DISCOVERY 560 (Vide Fig. 5) com objetivo de obter uma rugosidade na superfície (R_a) inferior a 0,8 μm de acordo com ASTM G99-05 (2010), essa rugosidade foi medida com um rugosímetro SURTRONIC 25.



Figura 5. Corpo de prova de liga de Alumínio 6262-T6.

Depois se fez a montagem no tribômetro MICROTTEST para obter os valores de coeficiente de atrito



Figura 6. Na esquerda tribômetro de pino sobre disco MICROTTESTS e na direita pino de metal duro microgrão revestido com (Ti,Al)N sobre disco de liga de Alumínio 6262-T6.

2.2. Montagem experimental

Com as trajetórias prontas procedeu-se a realizar a montagem no centro de usinagem ROMY DISCOVERY 560 da UFMG e da preparação do alumínio 6262-T6. Para obter a velocidade de rotação se usou uma turbina pneumática de AIR TURBINE TOOLS modelo 650BT40, um sensor de emissão acústica PSA300 Mc, um osciloscópio TEKTRONIX modelo TDS1001C-EDU e uma fresa de 1 mm de diâmetro com 2 arestas de corte de metal duro microgrão com um recobrimento de (Ti,Al)N (Vide Fig. 7).

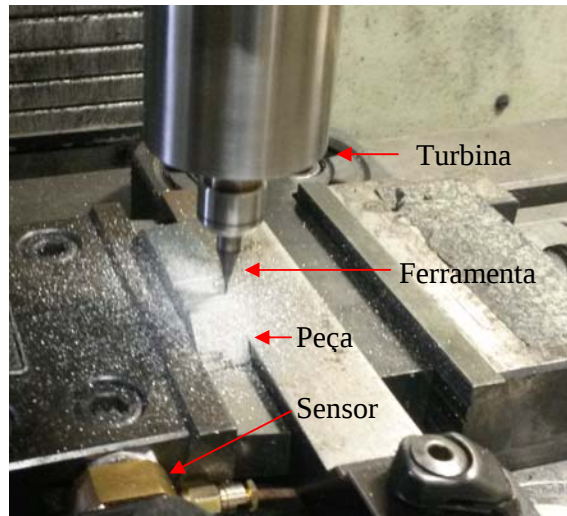


Figura 7. Montagem experimental.

3. RESULTADOS PRELIMINARES E ANÁLISES

3.1. Parâmetros de usinagem

A rugosidade do corpo de prova dos testes de coeficiente de atrito foi de $0,23 \pm 0,06 \mu\text{m}$ e cumpre a exigência da norma ASTM G99-05 (2010).

Pretendeu-se que a condições de teste de pino sobre disco foram as mais próximas das que seriam apresentadas na usinagem e para esse efeito o tribômetro configurou-se, a distância percorrida do pino sobre disco não ultrapassou 104 metros de deslizamento com uma velocidade de 63 m/min e uma força normal de 3N. Foi feita a seguinte suposição para determinar os parâmetros de corte: O raio da aresta do corte é o dobro da observada por Câmara, (2014) numa ferramenta do mesmo material e com o mesmo revestimento, mas com um diâmetro de 0,5 mm. Além disso, encontrou-se o coeficiente de atrito.

Tabela 1. Raio da aresta e coeficiente de atrito.

Raio da aresta de corte ρ (μm)	4,32
Coeficiente de atrito	$0,97 \pm 0,02$

Com os valores da Tab. 1 e a Eq. (1), o valor crítico da espessura de corte é $0,193 \mu\text{m}$, não se deve esquecer que este valor é o limite entre uma usinagem com deformação plástica do material sem remoção de cavaco e com remoção de cavaco.

A seguinte apresenta as condições de corte pela usinagem da peça, o avanço pela aresta de corte e 2,5 vezes maior ao valor da espessura critica. Planeja-se repetir os testes com um valor perto da espessura critica de corte.

Tabela 2. Parâmetros de usinagem.

RPM	Velocidade de corte (m/min)	Profundidade (mm)	Largura de corte (mm)	Avanço pela aresta (μm)	Avanço (mm/min)
40.000	126	0,300	0,100	0,480	38

Na Fig. 8 se mostra a peça usinada, note-se que primeiro foram feitos os canais exteriores cuja espessura é o mesmo diâmetro da ferramenta (1 mm) e, em seguida, o canal interno foi realizado com o caminho de corte proposto pelos autores. Os canais exteriores tem uma maior profundidade e foram feitos com a mesma profundidade de corte que o canal interior.

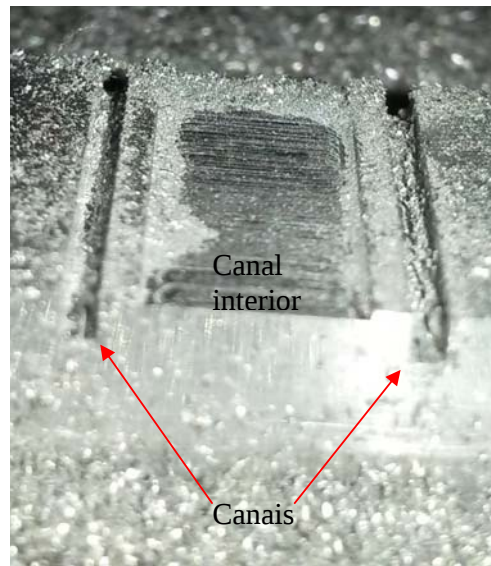


Figura 8. Peça usinada.

3.2. Emissão acústica

Para os canais exteriores (1 mm) a emissão acústica obtida foi de 328 mV até 1,17 V e se observou que com maior profundidade, a emissão acústica foi maior. Para o canal interior (6 mm) os valores de emissão acústica estiveram entre 111 e 478 mV. Para o canal interior, quando a ferramenta entra em contato com o material a ser removido, o valor da emissão acústica começou a aumentar (Vide Fig. 9).

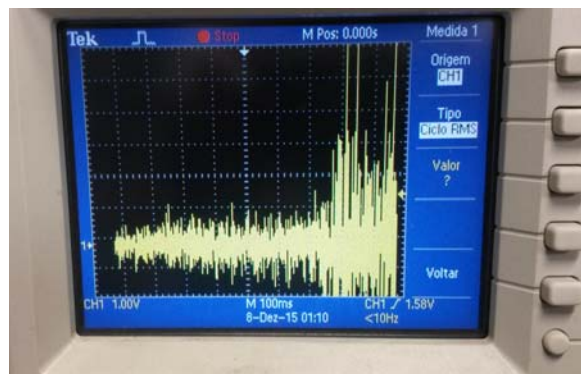


Figura 9. Emissão acústica.

3.3. Rebarbas

As imagens das Fig. 10 y Fig. 11 apresentam os diferentes rebarbas típicas obtidas no fresamento dos canais. No caso da Fig. 10, a imagem da esquerda apresenta as rebarbas formadas no canal de 1 mm de espessura. Na esquerda é possível ver as rebarbas formadas pelo deslocamento concordante da ferramenta e na direita do canal pelo movimento discordante. Na imagem da direita podem-se avistar as rebarbas na parede esquerda do canal interior (6 mm) onde a ferramenta tem um deslocamento discordante, também é possível ver no fundo de canal o caminho percorrido pela ferramenta.

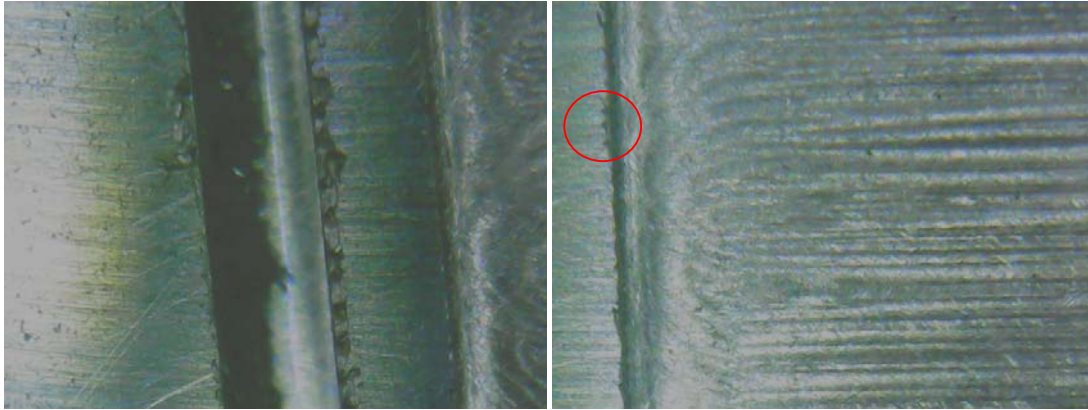


Figura 10. Rebarba de topo nos canais exteriores (esquerda) e no canal interior (direita).

Na esquerda da Fig. 11 é possível ver as rebarbas formadas na parede direita do canal de 1 mm de espessura onde a ferramenta tem um deslocamento concordante. Em quanto na parte direita da figura apresenta as rebarbas formadas na saída da ferramenta e onde seu deslocamento é discordante.

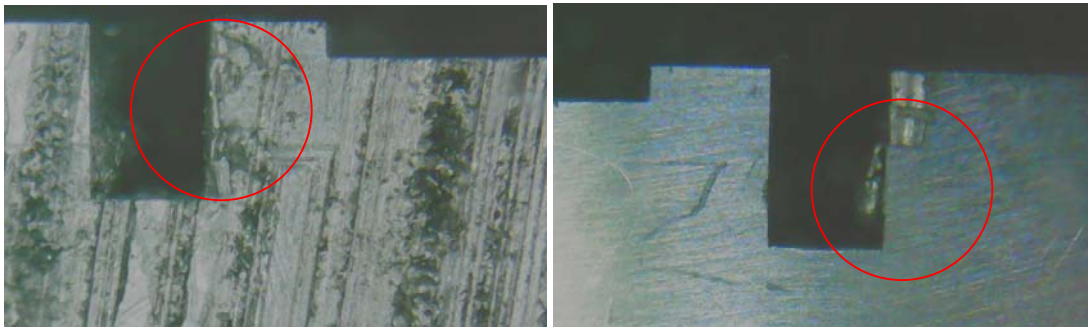


Figura 11. Rebarba lateral, na esquerda de entrada e na direita de saída.

3.4. Acabamento superficial

A Fig.12 apresenta a medição da rugosidade superficial no fundo do canal interior e a Tab. 3 mostra os valores da rugosidade Ra.



Figura 12. Medição de rugosidade no rugosímetro SURTRONIC 25.

Tabela 3. Rugosidade de canal interior

	Ra [μm]
n = 11	0,4
	0,34
	0,42
	0,52
	0,4
	0,38
	0,46
	0,58
	0,38
	0,42
	0,38
Valor médio	0,43
Desvio Padrão S =	0,07

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A variação da emissão acústica quando a ferramenta entra em contato com o material na trajetória de corte concebida, mostra uma emissão acústica sensível às frequências no microfresamento.

O canal interior tem de ser feita com maior profundidade com o fim de avaliar se as paredes finas (1 mm de espessura) tem uma deformação pelo usinagem, afetando a precisão dimensional.

Consegue-se ver que ocorrer rebarbas nos dois canais (exteriores e interiores). Devem-se analisar mais detalhadamente as rebarbas que foram apresentadas na peça de trabalho e comparar com aquelas geradas com outros caminhos de corte que se avaliariam num trabalho posterior.

No trabalho posterior e com os resultados obtidos para as outras trajetórias de ferramenta propostas e com o fim de fazer a comparação das características geométricas e da rugosidade em função da trajetória de corte e da espessura crítica de usinagem, se pretende fazer uma análise de variância nos resultados obtidos e dar uma significância aos mesmos.

5. REFERÊNCIAS

- Albertí, M., Ciurana, J. y Casadesús, M. 2005. "A system for optimising cutting parameters when planning milling". Journal of Materials Processing Technology. 2005, 168.
- Albertí, M., Ciurana, J. y Rodriguez, C. A. 2004. "Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy". International Journal of Machine Tools & Manufacture. Elsevier.
- Bao, W. Y. y Tansel, I. N. 2000. "Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model". International Journal of Machine Tools & Manufacture . 2000, Vol. 40.
- Câmara, M. A. 2014. "Influência do efeito escala sobre a operação de microfresamento". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais.
- De Oliveira-Leite, W., Campos, J. C.; Mata, F.; Tejero, J.; and Hanafi, I. e outros. 2014. "Utilización de modelos de redes neuronales artificiales para predecir la influencia del tipo de fresado en la calidad del producto". Dyna. Vol. 89.
- Koike, Y., Matsubara, A. and Yamaji, I. 2013. "Optimization of cutting path for minimizing workpiece displacement at the cutting point: changing the material removal process, feed direction, and tool orientation". Procedia CIRP. Elsevier, Vol. 5.
- Microtest, S.A. 2010. Microtest, S.A. [En línea] 2010. [Citado el: 15 de Outubro de 2015.] <http://www.microtest-sa.com/>.
- Monreal, M. y Rodriguez, C. A. 2003. "Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. Computer Aided Design". Elsevier.
- Shamsuddin, K. A., Ab-Kadir, A. R. and Osman, M. H. 2013. "A Comparison of Milling Cutting Path Strategies for Thin-Walled Aluminium Alloys Fabrication". The International Journal Of Engineering And Science. The Ijes, Vol. 2.
- Siller, H. Rodriguez, C. and Ahue, H. 2006. "Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing". Journal of Materials Processing Technology. Elsevier.
- Smith, S. and Dvorak, D. 1997. "Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs". Mechatronics. Pergamon.
- Thamban, I., Abraham, B. and Kuria, S. 2013. "Machining characteristics analysis of 6061-T6 aluminium alloy with diamond coated and uncoated tungsten carbide tool". International Journal of Latest Research in Science and Technology. Vol. 2.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

EVALUATION OF THE CUT PATHS IN THE QUALITY OF GEOMETRIES MANUFACTURED BY MICROMILLING PROCESS

Andrés Guillermo Guasca González, agguasca@gmail.com¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Juan Carlos Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627

Abstract. Today in high speed machining (HSM), not only the cutting parameters are important, the machining tool paths also have a big relevance. This is due to the influence in the geometric deviations, in the dimensional accuracy and in the surface finish of the parts. In the case of manufacturing of slender walls in high removal rate conditions may appear problems of static type as due to stress machining and the dynamic type like the chatter. On the other hand, micromilling operation is presented as an alternative for manufacturing of parts or structures with very small size and high dimensional precision and, at the same time, with high mechanical strength and magnetic and thermal properties. This parts or structures are very important for industries like the aerospace, aeronautic, biomedical and military, in a grand variety of materials such as titanium alloys, nickel alloys, copper alloys and others. Additionally, in the micro machining processes, the material removal mechanisms are modified by the "size effect" which influences, for example, the minimum thickness chips. This study aims to evaluate the effects of the different tool trajectories and the thickness critical machining in the micromilling process of the slender walls with high-speed cutting, analyzing their influence in the geometric characteristics and the surface finish of the part. The results show that for this type of machining, the proper choice of cutting parameters and the cutting tool paths have an important role in order to achieve greater accuracy of the shape and the surface finish.

Keywords: Micromilling, Aluminum, HSM, Surface finish.