

DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE UM MODELO DE FORMAÇÃO DE CAVACO NO FRESAMENTO ORBITAL DE FUROS CEGOS

Rodrigo Blödorn, rodrigo.blodorn@labmetro.ufsc.br^{1,2}

Luciano Sercone Fusco, lucianoserconekfuso@gmail.com^{1,2}

Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br¹

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., a.albertazzi@ufsc.br²

¹LMP, Laboratório de Mecânica de Precisão

²LABMETRO, Laboratório de Metrologia e Automação

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil CEP 88040-970 Cx.Postal: 5053

Resumo: A cinemática da ferramenta de corte em um processo de fresamento orbital executando um furo cego pode ser dividida em duas operações de usinagem distintas. A primeira consiste na remoção de material executada pelos gumes principais da fresa de topo, e a segunda no fresamento periférico executado pelos gumes secundários. No fresamento orbital, a dimensão da fresa e a excentricidade de orbitação devem ser combinadas para produzir o furo com o diâmetro desejado. O avanço na direção axial da ferramenta é realizado até a profundidade final do furo cego juntamente com o movimento orbital ou de forma dissociada. Para melhor compreender o processo de formação de cavaco na operação de furação através do fresamento orbital foi desenvolvido um modelo em MATLAB simulando o processo de usinagem. Este modelo possibilita a avaliação do volume de material removido durante uma rotação completa da fresa de topo, bem como a determinação da espessura teórica média do cavaco. Foi simulada a cinemática da formação do cavaco no fresamento orbital de furos cegos produzidos por fresas de topo reto, de diâmetro 1,00mm, executados até a profundidade de 1,00mm em 10 passos de 0,10mm e diâmetro final de 4,00mm. Ensaios de usinagem foram realizados para coleta de cavacos, os quais foram analisados quanto à forma e dimensão. Avaliações preliminares revelam boa assertividade entre as simulações e os cavacos produzidos pelo fresamento orbital.

Palavras-chave: Fresamento orbital, Furo cego, Fresa de topo reto, Formação de cavaco, Simulação da usinagem.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas e equipamentos mecânicos em operação podem conter, além dos esforços mecânicos em serviço, tensões residuais. Convenientemente citam-se suas origens de pelo menos quatro fontes principais: do processo de montagem, das tensões de origem térmica, das decorrentes da interação com o meio ambiente e as do processo de manufatura. Para a prevenção de falhas faz-se necessária a verificação de tensões residuais e o monitoramento das tensões mecânicas de operação. O Método do Furo Cego (MFC) para a medição de tensões residuais é um método largamente difundido na indústria, fornecendo resultados com rapidez e precisão. O MFC, embasado por crescentes pesquisas e contando com uma norma (ASTM E837-13a, 2013) para padronização dos experimentos, consiste na usinagem de um pequeno furo cego de fundo plano (dimensões geralmente não ultrapassando 2mm). A furação provoca a remoção de material, ocasionando assim o alívio de tensões na região do furo e possibilitando o rearranjo da estrutura do material.

O MFC tem sua origem no trabalho de Mathar (1934). Mas, Flaman (1982), ganhou maior notoriedade com seus estudos. A geometria almejada do furo cego é a de cilíndrico ideal, e para isso, o furo é usinado comumente utilizando fresas de topo odontológicas de metal-duro à base de carbeto de tungstênio ligado ao cobalto (WC-Co). Além disso, a rotação da ferramenta é realizada por turbinas pneumáticas em alta rotação (de 150 000rpm a 400 000rpm). Os avanços da ferramenta são bastante reduzidos (da ordem de 10mm/min) para evitar o travamento da turbina durante a furação, já que tais turbinas não dispõem de torque constante. Sendo assim, esta combinação de ferramenta usada em um processo de usinagem que não é sua função original somada às condições pouco usuais de usinagem, como a rotação muito alta quando comparada ao avanço (ver Fig. (1)), resulta em uma usinagem danosa ao material. Esta acaba dissipando muita energia através do atrito na interface ferramenta/peça devido à alta proporção rotação/avanço e introduzindo tensões residuais através de mecanismos térmicos e mecânicos (Davim, 2010). Deste modo, devido aos efeitos térmicos proveniente do atrito entre peça e ferramenta e de efeitos mecânicos como o encruamento (Blödorn *et al.*, 2015), faz-se necessário o mapeamento do processo de usinagem e sua otimização, de modo a reduzir ao máximo as tensões introduzidas por usinagem e obter um furo com geometria mais próxima possível da desejada.

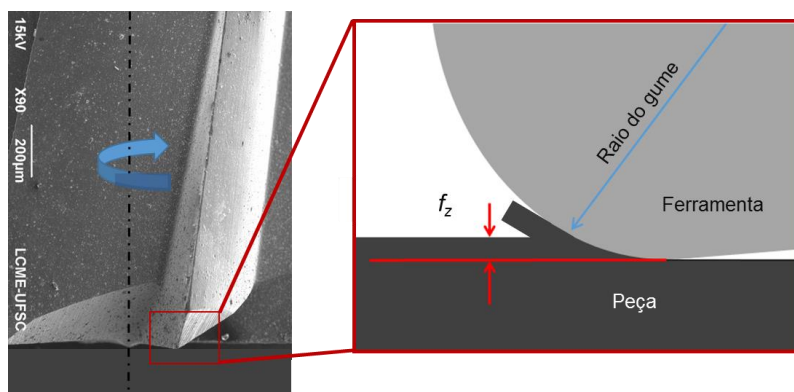


Figura 1. Esquema da furação empregada na medição de tensão residual pelo MFC.

Uma estratégia que pode ser adotada é a de fresamento orbital na usinagem do furo cego ao invés da furação em cheio com uma fresa de topo. A dinâmica do fresamento orbital consiste em um estágio de avanço na direção axial da ferramenta, realizando uma furação em cheio em uma estabelecida profundidade. Logo após, é iniciado o estágio de fresamento com a orbitação da ferramenta em torno de um eixo de rotação, em um movimento translacional, alargando o furo até o diâmetro final desejado. No fresamento orbital ambos os gumes principal e secundário são empregados na remoção de material, distribuindo o desgaste, além de, devido ao movimento de orbitação, criar um furo de diâmetro maior que o da ferramenta, facilitando a saída de cavacos (Li *et al.*, 2011; Iyer *et al.*, 2007).

O objetivo desse trabalho é desenvolver um modelo que simula a forma, dimensão e volume dos cavacos produzidos por fresamento orbital de furos cegos a partir dos gumes secundários de fresas de topo reto. São propostas algumas metodologias de validação do modelo baseadas na medição da largura, comprimento e espessura dos cavacos e a medição da sua massa. Também é proposta uma melhoria futura do modelo com a inserção de informações acerca da microgeometria do gume da fresa de topo reto empregada na usinagem e do Fator de Recalque dos cavacos.

2. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE FURAÇÃO

A aplicação do processo de usinagem deste estudo requer a produção de um furo cego com profundidade 1,00mm, sendo produzido em 10 incrementos de 0,10mm de profundidade cada. A fresa de topo se aproxima da profundidade programada, e então, inicia seu movimento orbital até atingir o diâmetro correspondente àquela profundidade. O furo cego inicial tem diâmetro Ø2,00mm e profundidade 0,10mm e, como pode ser visualizado na Tab (1), diâmetro final Ø4,00mm e profundidade 1,00mm.

Tabela 1. Diâmetros e respectivas profundidades dos furos cegos.

Dados gerais		Fresamento Incremental Orbital	
Incremento (i)	Profundidade (z) [mm]	Diâmetro do furo (d) [mm]	Relação z/d
1	0,10	2,00	0,050
2	0,20	2,22	0,090
3	0,30	2,44	0,123
4	0,40	2,67	0,150
5	0,50	2,89	0,173
6	0,60	3,11	0,193
7	0,70	3,33	0,210
8	0,80	3,56	0,225
9	0,90	3,78	0,238
10	1,00	4,00	0,250

A Figura (2) esquematiza os 10 passos realizados durante a usinagem. No primeiro incremento a fresa penetra na peça até a profundidade de 0,10mm e então orbita com excentricidade de 0,50mm para produzir o diâmetro de Ø2,00mm. Na sequência, para a usinagem do incremento 2, a fresa penetra no centro do furo anterior até a profundidade de 0,20mm e, em seguida, inicia seu movimento orbital para abrir o furo cego até o diâmetro de Ø2,00mm e, por último, orbita mais uma vez até atingir o diâmetro Ø2,22mm.

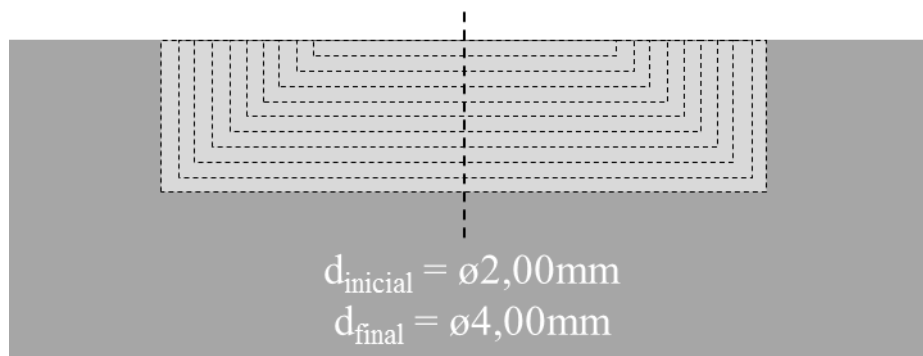


Figura 2. Esquema da furação empregada na medição de tensão residual pelo MFC.

Todos os incrementos têm o mesmo procedimento de usinagem. Após a primeira órbita com excentricidade 0,50mm, as órbitas seguintes aumentam o furo cego em 0,11mm no raio até atingirem o diâmetro programado para a respectiva profundidade. A Figura (3) esquematiza a usinagem dos três primeiros incrementos, iniciando sempre por um furo cego de diâmetro Ø1,00mm, pela penetração em cheio da fresa de topo na amostra.

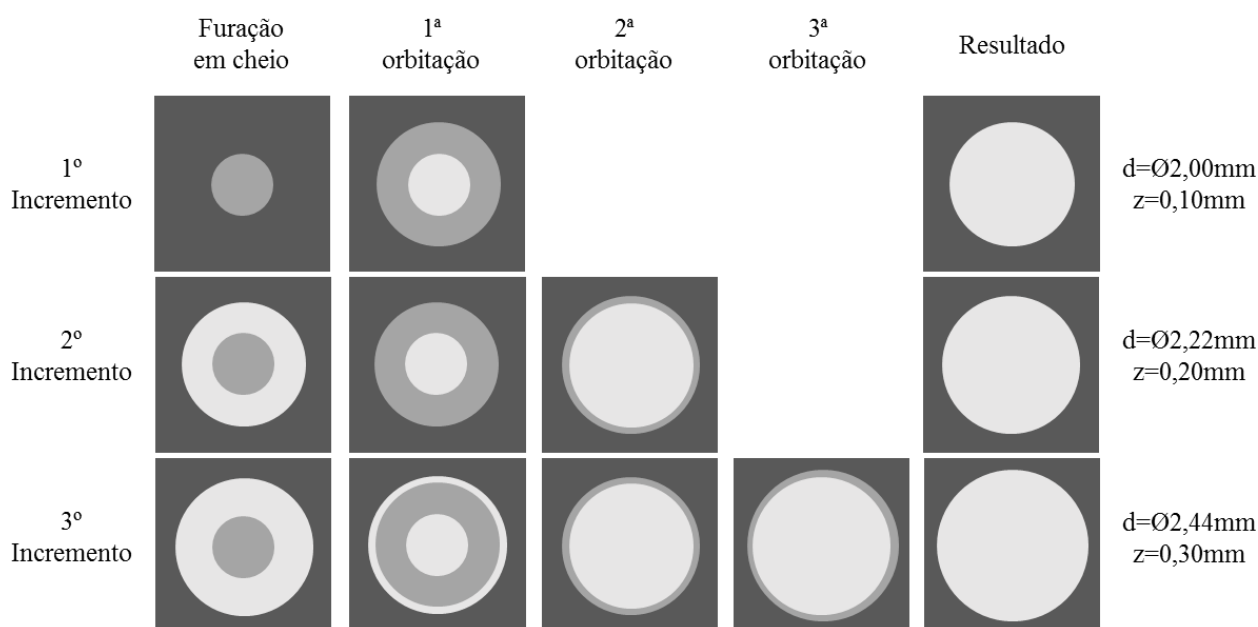


Figura 3. Esquema da usinagem empregada na produção dos furos cegos dos incrementos 1, 2 e 3.

No esquema mostrado anteriormente, nota-se o uso dos gumes principais e secundários da fresa durante a furação em cheio e fresamento orbital. O modelo desenvolvido neste trabalho contempla somente a formação do cavaco produzida pelos gumes secundários durante o fresamento orbital.

Os parâmetros de usinagem adotados nas simulações são velocidade de rotação da fresa de 10 000rpm e velocidade de avanço 40mm/min, tanto para o avanço axial como durante a órbita.

3. MODELO DO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO

Para a construção do modelo, foi adotada a hipótese de que o movimento de rotação é muito maior que a órbita da fresa. Sendo assim, no período de uma rotação, o deslocamento da órbita da fresa é muito pequeno e basicamente linear. Logo, são usadas 3 circunferências como referência para os cálculos: a circunferência **c**, que representa o furo base que está sendo alargado nesse processo de fresamento orbital; a circunferência **b**, que representa a ferramenta no instante de tempo anterior (correspondente a um período de rotação atrás) e a circunferência **a**, que é a ferramenta na posição atual. Como neste período de rotação a fresa estará removendo material, o volume removido corresponde à área entre a circunferência da nova posição, **a**, e as outras duas circunferências antigas, que representam instantes de tempo anteriores nos quais o material já havia sido removido. Na Figura (4), percebe-se que pelo sentido de rotação, a fresa orbita em sentido anti-horário e, logo, a aproximação da linearidade do seu movimento durante o curto intervalo de

tempo de uma rotação permite que se afirme que a fresa avança para a esquerda no novo intervalo de tempo. A circunferência de cor azul corresponde à circunferência **a**, a circunferência de cor preta corresponde à posição anterior da fresa, **b**, e a circunferência de cor vermelha corresponde ao furo já existente. É possível observar a área varrida pela fresa em uma rotação, preenchida na cor alaranjada.

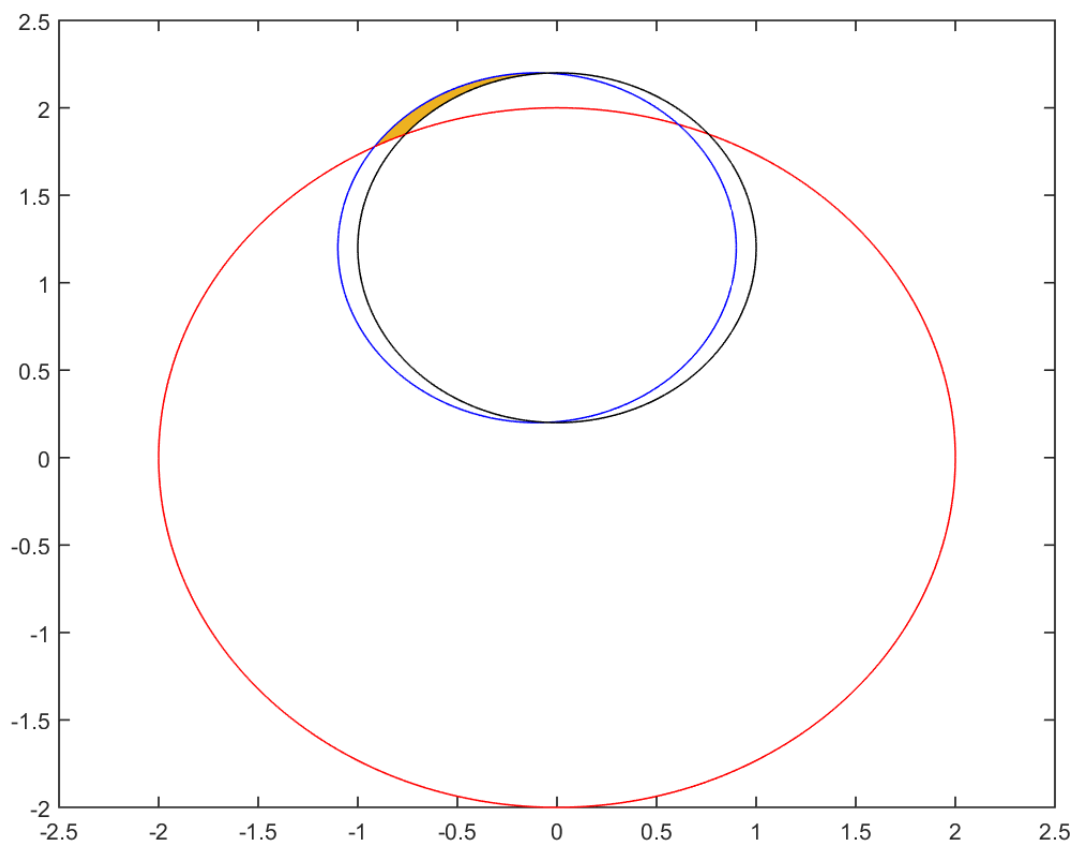


Figura 4. Representação esquemática das circunferências utilizadas nos cálculos.

Para o desenvolvimento do modelo os pontos de intersecção entre as circunferências foram encontrados, selecionando os pontos das circunferências, par a par, que apresentam distância zero entre si. Então, com esses pontos, é possível calcular a integral, trecho a trecho, da área que se situa entre as curvas das circunferências, e assim, sabendo a profundidade na qual se está fresando, obtém-se o volume de material removido em uma rotação da fresa.

4. MODELO DA ESPESSURA TEÓRICA DE USINAGEM

Utilizando as curvas das circunferências obtidas, delimitadas pelos pontos de intersecção calculados, é possível delimitar a área de material (quando a peça é vista de topo) que é removida durante uma rotação da fresa. Com o intuito de determinar a espessura de material removido ponto a ponto, para que se possa calcular uma espessura teórica média de usinagem, foram calculadas as distâncias entre cada ponto da circunferência **a** e todos os pontos das outras circunferências. Sendo assim, para cada ponto de **a**, foi selecionada a menor distância calculada, que é a que corresponde ao segmento diretamente representativo da espessura da área varrida pela fresa no ponto em voga. As retas que representam estas distâncias se encontram exibidas na Fig. (5).

É possível observar na Fig. (5) a representação de algumas das retas calculadas a partir de um dos pontos da circunferência **a**. Após o cálculo de todos estes segmentos, uma matriz é construída com as medidas das distâncias entre todos os pontos calculados, com cada linha correspondendo a um ponto de **a**, e cada coluna desta linha sendo a distância entre este ponto de **a** e cada ponto das outras circunferências (**c** e **b**) que delimitam a área varrida hachurada.

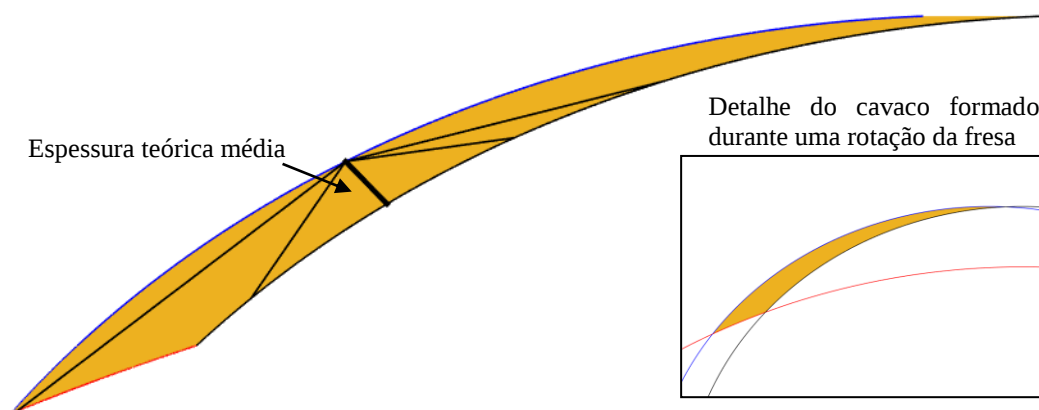


Figura 5. Ilustração das retas criadas para determinação da espessura teórica média do cavaco.

Por fim, é selecionado o valor mínimo de cada linha, resultando em um vetor contendo a espessura de todo o cavaco, ponto a ponto. Para o ponto da Fig. (5), foi calculada a espessura teórica média, denotada pelo segmento em destaque. Como o intuito é obter uma espessura média representativa, somou-se as componentes e dividiu-se pelo número de componentes, obtendo assim a espessura média da área hachurada.

Para os cálculos da espessura teórica de usinagem, ainda se conservou a hipótese de linearidade do modelo, admitindo que o movimento de orbitação é de velocidade constante e de pequena magnitude quando comparada à velocidade de rotação da fresa. Assim, pode-se considerar que cada gume remove uma quantidade igual de material, e a espessura teórica média de usinagem para cada estágio de alargamento na orbitação pode ser calculada dividindo a espessura obtida (que é a espessura total removida em uma rotação) pelo número de gumes da fresa.

Também é importante ressaltar que no modelo, *a priori*, não se cogitou o Fator de Recalque do material durante a usinagem. Esse detalhe ainda está em desenvolvimento e será implementado a partir das análises do cavaco produzido experimentalmente.

5. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Testes experimentais de usinagem foram planejados para complementar o modelo teórico e aproximá-lo da realidade. Fresas de topo de metal-duro de micro-grão (liga de carboneto de tungstênio e cobalto, WC-Co) revestidas com Nitreto de Titânio (TiN) foram utilizadas nos testes de usinagem em liga de aço ABNT 1020, como ilustrado na Fig. (6). As amostras de aço ABNT 1020 foram preparadas nas dimensões 135mm x 25mm x 6,30mm.

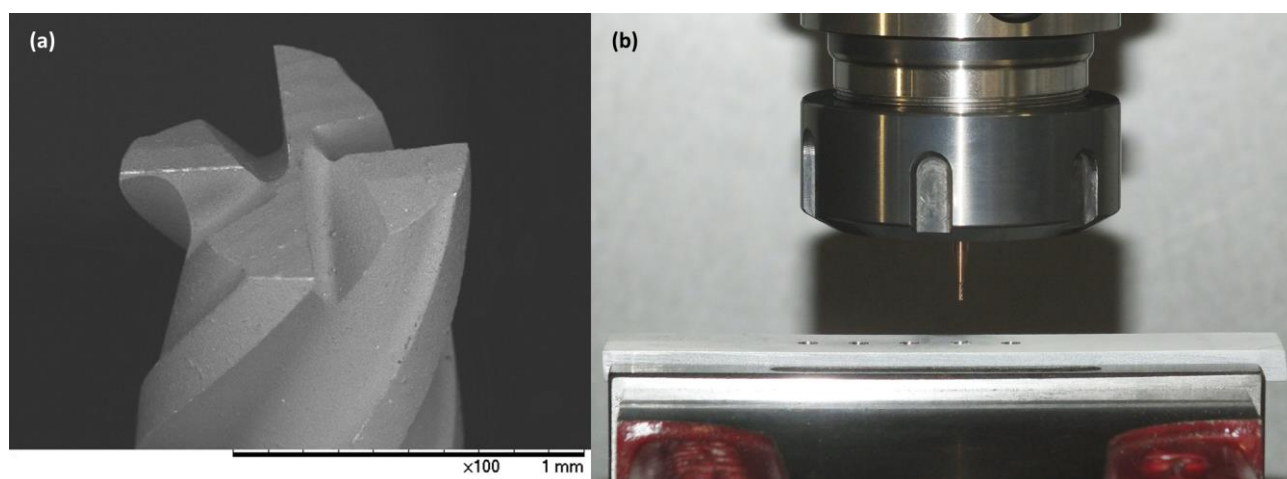


Figura 6. Validação experimental: (a) Fresa de topo reto, (b) Ensaio de usinagem dos furos cegos.

Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem Romi D600 com rotação máxima de 10 000rpm e G0 de 30m/min nos eixos X, Y e Z. Este centro de usinagem está instalado em uma sala com temperatura controlada por um sistema de condicionamento de ar com controle de temperatura convencional.

Após a usinagem completa do furo cego o cavaco depositado (ver Fig. (7)) sobre a superfície da amostra foi coletado e analisado no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Durante a coleta todo o cavaco foi recolhido, ou seja, não foi possível separar previamente o cavaco produzido somente pelos gumes secundários por fresamento orbital.



Figura 7. Coleta dos cavacos para análise e validação do modelo.

Para validação do modelo de determinação do volume do cavaco são propostas algumas alternativas. A primeira é a medição, através das imagens obtidas no MEV, das dimensões do cavaco: espessura média, largura e comprimento. A segunda é a medição da massa dos cavacos em uma balança de precisão. Deste modo, busca-se comparar o volume real com o volume teórico e a espessura real com a espessura teórica determinada numericamente. Ademais, é prevista a inclusão de considerações acerca de informações sobre a microgeometria do gume da fresa de topo reto e a determinação de um valor aproximado ao fator de Recalque do cavaco no modelo. Algumas destas alternativas estão em fase de avaliação, entretanto, ainda não é possível prever sua acurácia ao problema proposto.

6. RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura (8a) apresenta uma imagem em MEV com vista de topo do furo cego produzido pelos ensaios experimentais de usinagem. É possível observar no centro do furo a marca da fresa ao se deslocar em direção à periferia para aumento no diâmetro do furo. Também são visíveis as marcas de avanço durante a orbitação, na qual remove material do fundo e da parede do furo.

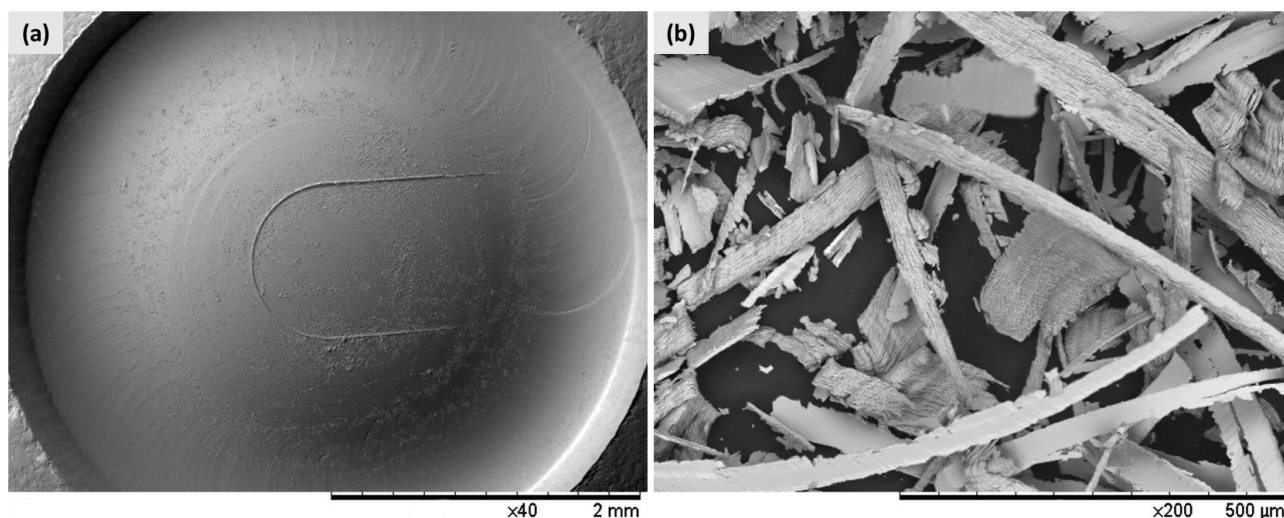


Figura 8. (a) Furo cego de diâmetro Ø4,00mm e profundidade 1,00mm, (b) Forma dos cavacos produzidos para o aço ABNT 1020.

Na Figura (8b) pode-se observar os cavacos oriundos do processo de usinagem deste estudo. A partir dessas imagens, o modelo está pronto para receber informações como o raio de gume das ferramentas e o Fator de Recalque do cavaco. Isso possibilitará aproximar a avaliação numérica da forma do cavaco com a sua forma real e permitir uma melhor compreensão acerca da influência dos parâmetros de usinagem sobre o desgaste das ferramentas de corte e a qualidade do furo produzido. O modelo também foi desenvolvido para facilmente ser estendido a outros materiais. O entendimento de como ocorre a formação do cavaco é fundamental para o desenvolvimento dos processos de remoção de material por usinagem.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho busca otimizar a usinagem de um furo de fundo plano, comumente utilizado na medição de tensões residuais pelo MFC, introduzindo o fresamento orbital como alternativa à furação em cheio com fresa de topo reto, com intuito de obter melhores condições de usinagem do furo, como maior espessura teórica de usinagem, facilitar a saída dos cavacos produzidos e reduzir a área afetada pelo contato da ferramenta contra a peça.

As aproximações e hipóteses, como por exemplo a de considerar movimento linear de orbitação da fresa durante o intervalo de uma rotação da fresa feitas no modelo, são condizentes com o processo real do fresamento em questão, visto que a velocidade de orbitação deve ser pequena comparada à velocidade de rotação, com intuito de garantir a estabilidade da ferramenta no processo de usinagem. Além disso, esta diferença entre o movimento real da fresa e o movimento adotado no modelo (para facilidade de reprodução e redução no tempo e custo computacionais) pode ser compensada com um leve ajuste no Fator de Recalque a ser estipulado na sequência do trabalho.

O modelo descrito neste trabalho ainda necessita de uma validação experimental mais robusta, principalmente na determinação da espessura média dos cavacos através das imagens obtidas por meio do MEV ou pela medição da sua massa para o cálculo do volume de material removido por rotação da fresa.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Centro Universitário de Brusque (UNIFEBS) por terem disponibilizado sua infraestrutura; ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica (CNPq/PIBITI) e ao PRFH-034/Petrobras pelos recursos financeiros para compra de materiais e concessão de bolsa de doutorado.

9. REFERÊNCIAS

- ASTM INTERNATIONAL, 2013, ASTM E837 – 13a – Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. West Conshohocken, 16 p.
- Blödorn, R., Viotti, M.R., Schroeter, R.B. and Albertazzi Jr., A.G., 2015, “Analysis of Blind-Holes Applied in the Hole-Drilling Method for Residual Stress Measurements”, *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 9, pp. 1745–1756.
- Davim, J.P., 2010. “Surface Integrity in Machining”, Springer, Berlin, Germany, 215 p.
- Flaman, M.T., 1982, “Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-hole Method of Residual-stress Measurement”. *Society for Experimental Mechanics*, Bethel, Vol. 22, No. 1, pp. 26-30.
- Iyer, R., Koshy, P. and Ng, E., 2007, “Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 205–210.
- Li, Z., Liu, Q., Peng, C. and Sun X., 2011, “Cutting force modelling and simulation for hole-making process by helical milling”, *Proc. SPIE 7997 - Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering*, Vol. 7997, pp. 99703-1 - 99703-6.
- Mathar, J., 1934. “Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes”, *Transactions ASME*, Vol. 56, p. 249–254.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

A PRELIMINARY MODEL DEVELOPMENT OF CHIP FORMATION IN BLIND HOLES THROUGH ORBITAL MILLING

Rodrigo Blödorn, rodrigo.blodorn@labmetro.ufsc.br^{1,2}
Luciano Sercone Fuso, lucianoserconefuso@gmail.com^{1,2}
Rolf Bertrand Schroeter, rolf.schroeter@ufsc.br¹
Armando Albertazzi Gonçalves Jr., a.albertazzi@ufsc.br²

¹LMP, Precision Engineering Laboratory

²LABMETRO, Metrology and Automatization Laboratory

Federal University of Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brazil. ZIP Code 88040-970 PO Box: 5053

Abstract: *The drilling tool kinematics in an orbital hole drilling process can be divided in two different machining stages. The first consists in the material removal performed by the end cutting edges, and the second is composed by the peripheral milling employing the lateral cutting edges. The orbital drilling process demands the combination of end mill dimension and orbital eccentricity to produce a hole with desired diameter. Consequently, the tool axial feed is performed until final hole depth is reached combined with orbital movement, or conducted in stages: first, direct drilling is executed, then the orbital milling is performed. A machining simulation model was developed in MATLAB in order to better comprehend the chip formation process in orbital milling. The volume of material removed per tool rotation is evaluated in this model, as well as theoretical average chip thickness. The chip formation in the orbital milling was simulated for holes machined by 1,00mm diameter flat end mills, with final hole diameter of 4,00mm drilled in 10 steps of 0,10mm each, totaling 1,00mm depth. Machining tests were performed to collect chips, which were analyzed for shape and size. Preliminary results reveal good assertiveness between simulations and chips produced by orbital milling.*

Keywords: *Orbital milling, Blind hole, Flat end mill, Chip formation, Machining simulation.*