

AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE FUROS CEGOS NO FRESAMENTO ORBITAL PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM FRESAS DE TOPO RETO

Jônatas Juliano Verwiebe

Rodrigo Blödorn

Centro Universitário de Brusque – UNIFEDE, Rua Dorval Luz, 123 – Santa Terezinha – CEP: 88352-400 – Brusque/SC – Cx. Postal: 1501

jonatas.verwiebe@gmail.com; rodrigoblodorn@unifebe.edu.br

Resumo. Com a contínua necessidade humana de construir maiores e melhores estruturas, torna-se de grande importância a medição das tensões residuais no interior destas, visando evitar falhas estruturais. Existem diversas maneiras de realizar estas análises, dentre elas, o Método do Furo Cego (MFC) tornou-se uma importante forma de análise devido à sua facilidade de execução, baixo custo e precisão dos resultados, visto que outras técnicas possuem limitações em alcançarem a geometria estabelecida por norma para este tipo de furo. Este trabalho visa analisar a geometria de furos cegos usinados comumente na análise de tensões residuais, onde busca-se atender a norma vigente (ASTM E 837-13a (2013)). Para esta análise, o método de usinagem do furo cego utilizado foi o fresamento incremental orbital (FIO) com diferentes valores de profundidade, diâmetro e incrementos laterais de corte (0,88 e 0,44 mm), mantendo a razão máxima z/d de 0,250, onde z é a profundidade e d o diâmetro do furo. Utilizou-se os parâmetros de rotação de 5 000 rpm, com velocidades de avanço da mesa e do eixo vertical variando entre 60 e 100 mm/min, em um centro de usinagem Romi D600, sendo que para a usinagem utilizou-se fresas de topo reto de 4 mm de diâmetro, fabricadas de metal-duro e revestidas com TiSiN, além de analisar-se o uso de ar comprimido como meio de resfriamento e fonte de auxílio para o escoamento de cavaco. Neste cenário, maiores incrementos de corte se mostraram úteis na formação da geometria do furo.

Palavras chave: Usinagem. Geometria. Furo Cego. Parâmetros de usinagem.

1. INTRODUÇÃO

O estudo das medições de tensão residual através do Método do Furo Cego (MFC) tiveram início por volta dos anos 1930, onde, Joseph Mathar iniciou suas pesquisas nesta área, com diversos aspectos similares aos usados nos dias atuais, porém com menos recursos e tecnologias em máquinas e ferramentas.

Os componentes mecânicos, independentemente de tamanho ou forma, estão sujeitos a sofrerem tensões residuais devido a possíveis cargas externas ou em função de descontinuidades da rede cristalina do material, por exemplo. O resultado de um demasiado acúmulo destes carregamentos em metais pode acarretar em rupturas e possíveis falhas estruturais. Este fato pode ser facilmente visto no âmbito mecânico, pois estas tensões residuais se somam com as tensões de trabalho, podendo ultrapassar a tensão limite de escoamento do material.

As tensões residuais podem ser favoráveis no estado compressivo, pois, de acordo com Schajer e Whitehead (2018), estas tensões de compressão são geralmente preferíveis às de tração. Esta preferência dá-se pela sua resistência à fadiga, à corrosão e pelo retardo na propagação de trincas. Em contrapartida, tensões residuais de tração têm, geralmente, o efeito oposto, uma vez que aceleram a propagação de falhas dos componentes.

Tendo em vista esta necessidade de acompanhamento periódico do estado das tensões residuais, o MFC é visto como um método muito atrativo, pois ele pode ser analisado tanto em laboratórios e centros de pesquisa, como também pode ser analisado em campo, no real ponto de atuação da estrutura ou componente mecânico.

As tensões residuais podem surgir durante a fabricação de peças fundidas, por exemplo, durante o processo de resfriamento. Enquanto as camadas externas do material resfriam e enrijecem com maior velocidade, as camadas internas das peças continuam líquidas e em movimento, podendo causar irregularidades na microestrutura das camadas cristalinas do material.

Segundo Schajer e Whitehead (2018), o MFC é empregado em larga escala mundialmente e possui elevada confiabilidade. Este método consiste em usar um furo passante, ou não, na superfície do material em que se busca conhecer o estado de tensões. Após isso, deve-se medir a deformação na superfície adjacente ao furo usinado, fazendo o uso de extensômetros (*strain gauges*), buscando-se obter o resultado das tensões perpendiculares à nova camada de material criada com a usinagem do furo. A partir de algumas propriedades do material em análise, e o conhecimento da geometria do furo, calculam-se as tensões cartesianas e a direção da tensão principal.

O Método do Furo Cego é um dos dois únicos métodos de análises de tensões residuais que possuem normas específicas de controle, o outro método é o da difração de raios-x. A norma que regulamenta o MFC é a ASTM E837.13a (2013). Conforme previsto na norma, o furo usinado deve possuir fundo plano com geometria perfeitamente cilíndrica e perpendicular à superfície, sendo que esta é a maior dificuldade encontrada na execução deste método. Quanto mais próximo deste modelo estiver o furo, melhor o mesmo representará um furo cego padronizado.

Paralelo a esta prática, Blödorn (2018) estudou a técnica de Fresamento Incremental Orbital (FIO), onde, segundo o autor, o diâmetro do furo aumenta juntamente com a profundidade, mantendo a relação de usinagem escolhida. Esta combinação além de introduzir menores tensões à peça, também favorece o controle da geometria da mesma. Ainda segundo o autor, para a relação empregada sugere-se usinar a profundidade do furo com 25% do valor do diâmetro.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar a usinagem do furo cego por fresamento orbital, conforme o trabalho desenvolvido por Blödorn (2018). O estudo envolve a usinagem de furos cegos por meio da técnica de Fresamento Incremental Orbital (FIO) com fresas de topo reto de 4 mm de diâmetro. O principal intuito do trabalho é obter furos com o menor erro possível de perpendicularidade entre as paredes laterais e o fundo do mesmo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tensões Residuais

Os estudos com o intuito de mensurar as tensões residuais tiveram início na década de 1930 onde, Joseph Mathar iniciou pesquisas com fresamento de furos cegos com baixas rotações a fim de medir as tensões residuais presentes nas amostras após a usinagem. Este propôs medir a deformação elástica nas extremidades do furo usinado, que possuía 6 mm de diâmetro, por meio de extensômetros mecânicos de 157 mm de comprimento e tendo 8 mm de distância do centro do furo em uma placa tensionada uniaxialmente.

De acordo com Schajer (2013), os métodos de manufatura de produtos ou peças introduzem tensões residuais aos materiais. Caso não haja um carregamento destas tensões durante a manufatura, as mesmas podem vir a acontecer durante sua vida em serviço. Segundo o autor, fazem parte dos mecanismos de formação de tensões residuais:

- Modificações da superfície: ocorrem, por exemplo, durante os processos de usinagem por jateamento;
- Mudança de fase ou de material: geralmente ocorrem em grandes variações de temperaturas, como por exemplo em operações de soldagem, tratamentos térmicos e também em fundição.
- Deformação plástica não-uniforme: acontecem em processos que alteram a forma do material como, por exemplo, laminação, forjamento e conformação.

Segundo El-Khabeery e Fattou (1989), El-Axir (2002) e Davim (2010), encontra-se na literatura que o valor absoluto da tensão residual próximo à superfície de um material usinado é elevado, diminuindo de intensidade continuamente com o aumento da profundidade abaixo da superfície. Esta informação é um reflexo do fato de que, conforme o aumento da profundidade do furo, as tensões oriundas da remoção de material estão mais distantes da superfície da peça, onde estão alocados os extensômetros.

Conforme Schajer (2013), deformações nas superfícies usinadas devido a tensões residuais podem causar sérios danos em componentes, principalmente quando se solicitam precisões dimensionais estreitas. Segundo o autor, a implementação de tratamentos térmicos após a usinagem de certos materiais ou a realização das etapas de usinagem por incremento, de preferência simetricamente, são possíveis saídas para amenizar os efeitos das tensões residuais geradas na usinagem de furos cegos.

2.2. Fresamento Incremental Orbital (FIO)

A estratégia de medição de tensão residual conhecida por Fresamento Incremental Orbital (FIO), desenvolvida por Blödorn (2018), realiza a usinagem do furo cego em diversos incrementos, onde o diâmetro e a profundidade do furo aumentam simultaneamente, como pode ser observado na Fig. 1.

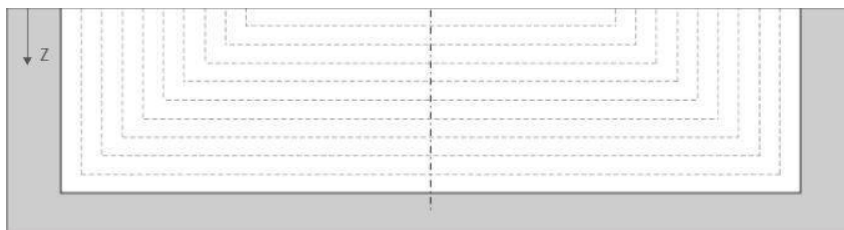


Figura 1. Estratégia de usinagem FIO (Adaptado de Blödorn, 2018)

Na Figura 1, o furo ilustrado possui diâmetro e profundidade iniciais de 2,00 e 0,10 mm, respectivamente. Após os dez incrementos realizados, o furo apresenta 4,00 mm de diâmetro e 1,00 mm de profundidade. Ainda, conforme a Fig.

1, o furo cego é usinado em vários incrementos, sendo respeitados os parâmetros de usinagem previamente estabelecidos e mantendo a relação de profundidade *versus* diâmetro escolhida.

2.3. Outros métodos de usinagem do furo cego para medição das tensões residuais

O fresamento orbital é um processo de usinagem também empregado para a realização de furos cegos. Esta técnica consiste em um movimento helicoidal da ferramenta de fresamento em torno do seu próprio eixo, onde apresentam-se algumas vantagens em relação à furação em cheio – tradicionalmente utilizada no MFC. Dentre estas vantagens, pode-se citar a diminuição no desgaste das ferramentas, menor força de corte e baixas deformações em função do efeito térmico. O caminho da orbitação pode ser dividido em várias etapas, tendo assim, inúmeras maneiras de usinar a mesma peça.

Schajer e Whitehead (2018) citam que o fresamento orbital foi uma técnica de usinagem introduzida ao MFC por Flaman e que, dentre suas principais vantagens, pode-se citar: a melhoria no corte do material em relação à furação em cheio (pois realiza cortes com suas faces laterais), a melhoria na remoção do cavaco gerado e a notável redução na força de corte. Schajer (2013) lista outras vantagens desta técnica em relação à furação em cheio, como por exemplo: redução da passagem de calor da fresa para a peça (pois há menos tempo de contato no mesmo ponto entre as superfícies) e redução da deflexão da fresa em função da menor força de usinagem exercida radialmente entre a ferramenta e a peça.

De acordo com Justus (1999), a usinagem do furo cego por remoção eletroquímica possui algumas vantagens em relação aos outros métodos como, por exemplo, a ausência de tensões residuais introduzidas à peça durante a usinagem, visto ser um método ausente de energias térmicas e mecânicas sobre a peça. Porém, o autor ressalta que esta técnica possui limitações em relação às outras na questão da geometria do furo, onde o controle dimensional das paredes e do fundo é algo difícil de se obter.

Neste contexto, Justus (1999) pôde concluir que a técnica utilizada não foi capaz de atingir a geometria do furo requerida, porém obteve-se êxito na usinagem de furos cegos sem a introdução de tensões residuais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos experimentos foram utilizadas fresas de topo reto de metal-duro revestidas por TiSiN, com quatro gumes de corte, diâmetro 4,00 mm e comprimento 50 mm. Estas, por sua vez, foram caracterizadas geometricamente, com o intuito de dimensionar suas grandezas como: raio de gume, ângulo de incidência, ângulo de saída e ângulo de cunha, conforme Fig.2 (a).

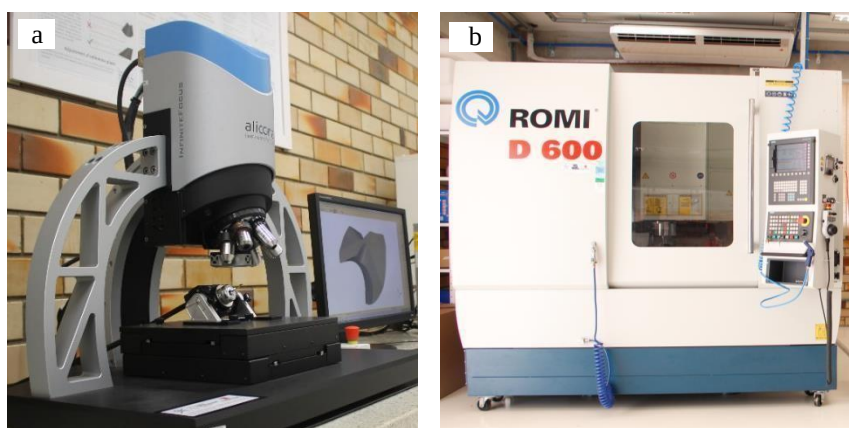


Figura 2. Fresa de topo reto sendo caracterizada pelo microscópio de foco infinito ALICONA® (a); Centro de Usinagem vertical ROMI modelo D600 (b)

Esta caracterização geométrica foi realizada com o auxílio de um microscópio de foco infinito ALICONA® *Infinite Focus* G5 (Fig. 2 (a)). Este equipamento está disponível no Centro Universitário de Brusque – UNIFEU e está localizado no NTIF (Núcleo de Tecnologia e Inovação em Fabricação).

A utilização deste equipamento permite realizar a medição do desgaste das ferramentas de usinagem utilizadas nos ensaios, pois o equipamento permite realizar a medição da diferença de geometria antes e após os ensaios. A Fig. 3 apresenta uma imagem da caracterização de uma fresa de topo reto, utilizando o ALICONA®.



Figura 3. Caracterização de uma fresa de topo reto utilizando o ALICONA®

Os corpos de prova utilizados nos ensaios são de aço inoxidável AISI 304L, com dimensões de 140 mm de comprimento, 25 mm de largura e 6,35 mm de espessura. No total foram utilizados 4 corpos de prova.

Os ensaios de fresamento incremental orbital foram realizados em um centro de usinagem Vertical ROMI D600 (Fig. 2 (b)), disponível no NTIF do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE. O centro de usinagem dispõe de uma potência do motor principal de 15 kW, rotação máxima do eixo-árvore de 10 000 rpm, mesa com dimensões de 840 mm por 500 mm, torre porta-ferramenta com 20 posições e comando numérico Siemens.

Os parâmetros de usinagem empregados neste trabalho estão descritos na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios

Ensaio	Avanço da mesa (mm/min)	Avanço do eixo vertical (mm/min)	Rotação da ferramenta (rpm)	Incremento de corte lateral (a_e)
1	100	80	5000	0,88
2	80	80	5000	0,88
3	100	80	5000	0,44
4	80	60	5000	0,44
5	60	60	5000	0,44

A fixação dos corpos de prova na mesa da máquina foi realizada por meio de uma morsa hidráulica. As ferramentas utilizadas nos testes foram todas fixadas na pinça da máquina, sendo deixado 16,5 mm de balanço entre a extremidade da ferramenta e o final da fixação. Ao lado da ferramenta, fez-se uso de um sistema de resfriamento por meio de ar comprimido, que além de auxiliar na diminuição do calor gerado também permite melhor escoamento do cavaco.

As relações de profundidade e diâmetro utilizado pela técnica FIO neste trabalho estão descritas na Tab.2.

Tabela 2. Relação z/D_o para a estratégia FIO

Incremento	Profundidade (z) [mm]	Diâmetro do furo (D_o) [mm]	Relação z/D_o
1	0,4	8,00	0,050
2	0,8	8,88	0,090
3	1,2	9,76	0,123
4	1,6	10,68	0,150
5	2,0	11,56	0,173
6	2,4	12,44	0,193
7	2,8	13,32	0,210
8	3,2	14,24	0,225
9	3,6	15,12	0,238
10	4,0	16,00	0,250

Executando-se a usinagem de um furo cego, conforme a sequência ilustrada na Tab. 1, nota-se que a relação entre profundidade e diâmetro do furo inicia em 0,050 e termina em 0,250.

Após a usinagem de cada furo cego, os corpos de prova foram levados ao microscópio de foco infinito ALICONA® para que o dimensionamento tridimensional do furo fosse realizado. Na coleta de dados (realizada após a usinagem de cada furo) realizada pelo *software* são analisados parâmetros como: perpendicularidade das paredes e diâmetro do furo, por exemplo. Para realizar este dimensionamento, os corpos de prova devem ser fixados em uma pequena castanha, esta por

sua vez, é fixada abaixo das lentes do microscópio para que as medições sejam realizadas. A Fig. 4 ilustra um dimensionamento tridimensional empreendido por Blödorn (2018).

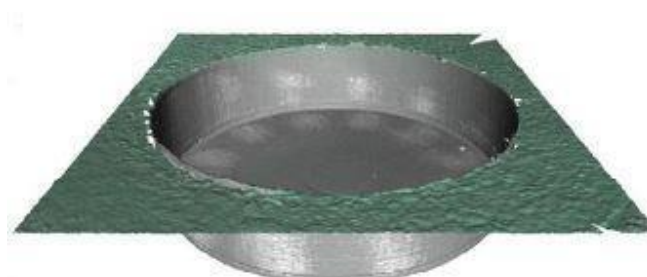


Figura 4. Corpo de prova após a reconstrução tridimensional (Blödorn, 2018)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro ensaio, além dos parâmetros descritos na Tab. 1, utilizou-se ar comprimido como meio de auxiliar no resfriamento do processo e também para eliminar parte do cavaco gerado durante a usinagem. Com a combinação destes parâmetros foi possível a usinagem de 4 furos por completo, pois ao final da usinagem do quarto furo a ferramenta estava com todos os seus quatro gumes danificados, fato que interfere diretamente na geometria do furo.

Este parâmetro de usinagem apresentou bom desempenho nos testes executados muito em função da velocidade de avanço da mesa ter sido posta em um nível médio (em relação aos outros testes), fazendo com que a ferramenta não permanecesse em demasiado tempo em confinamento com a peça. Certamente este fato aumentaria a temperatura de usinagem e diminuiria sua vida, e em uma situação oposta (avanço elevado) certamente maiores danos por choque mecânico seriam observados.

Os furos usinados por esta ferramenta tiveram ótimos e expressivos resultados de perpendicularidade, dentre os 4 furos gerados, a média de perpendicularidade das paredes laterais com o fundo do furo foi de $90,05^\circ \pm 0,21^\circ$. Na imagem gerada pelo *ALICONA*® a seguir (Fig. 5), é possível perceber a pequena diferença de geometria ao longo da altura do primeiro furo usinado por esta ferramenta (erros de usinagem somado a fatores externos).

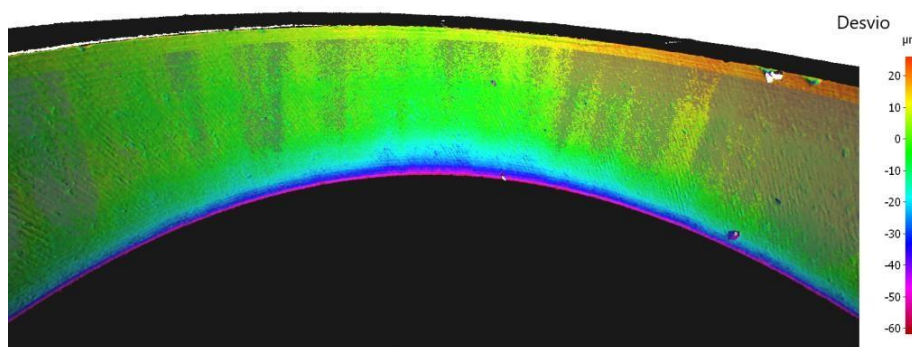


Figura 5. Desvio geométrico de um dos furos gerados no ensaio 1

O segundo ensaio realizou pequenas alterações nos parâmetros, conforme Tab. 1. Neste caso, também fora utilizado ar comprimido como método de resfriamento e escoamento do cavaco, com isso, a ferramenta foi capaz de realizar a usinagem de três furos antes da falha de seus gumes.

Quando comparada com a ferramenta anterior, esta gerou geometria final do furo com precisão levemente inferior, mas ainda com alta confiabilidade. Ao final dos três furos gerados, a média da perpendicularidade entre estes foi de $89,8^\circ \pm 0,56^\circ$.

Esta perda de precisão pode facilmente ser observada na imagem a seguir (Fig. 6) gerada pelo *software* do *ALICONA*®, onde é notório que o desgaste da ferramenta tem grande influência na geometria final dos furos.

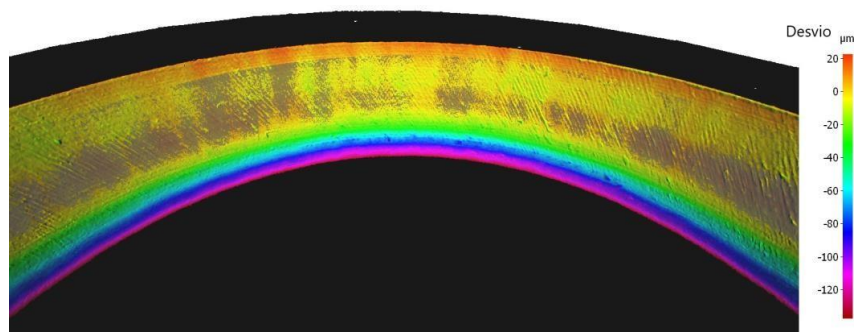


Figura 6. Variações de perpendicularidade geradas no último furo usinado pelo segundo ensaio

No terceiro ensaio, alterou-se o incremento de corte lateral (a_e) de 0,88 mm para 0,44 mm, conforme dados da Tab. 1, além de empregar ar comprimido no processo. Nestas condições foi possível usinar apenas um furo com a ferramenta, pois esta apresentou lascamento de seus gumes no segundo incremento (0,8 mm de profundidade). Visando ter-se maior confiabilidade nos parâmetros utilizados, foi realizado mais um ensaio nas mesmas condições com uma nova ferramenta, porém os resultados foram exatamente os mesmos do ensaio anterior.

A precoce falha de ambas as ferramentas nesta condição pode ser entendida pelo conjunto de ações que têm como consequência o aumento da temperatura como, por exemplo, a redução do incremento de corte lateral a_e pela metade, elevando o tempo de confinamento da ferramenta no furo e, conseqüentemente, o calor gerado, além da velocidade de avanço lateral da ferramenta estar elevada para este parâmetro (100 mm/min).

No ensaio de número 4, apesar de ter se mostrado um conjunto de parâmetros onde a ferramenta é capaz de ter boa resistência ao desgaste, este cenário foi o que apresentou a condição menos favorável de perpendicularidade das paredes laterais com o fundo do furo. Dentre os quatro furos usinados, a média de perpendicularidade entre eles foi de $91,02^\circ \pm 0,98^\circ$, valor acima das demais condições.

No quinto ensaio, com mudança no parâmetro de avanço da mesa para 60 mm/min, foi possível de realizar a usinagem de dois furos antes que a ferramenta fosse totalmente danificada. Este parâmetro analisado teve eficiência inferior em relação ao anterior em função da menor velocidade de avanço da mesa (60 mm/min) aliada à redução do incremento de corte lateral da ferramenta (a_e), que fizeram com que, notadamente, a temperatura de corte fosse bastante elevada durante a usinagem, facilitando a perda do revestimento da ferramenta e a conseqüente fratura de seus gumes.

Com estas alterações nos parâmetros, esta condição de usinagem mostrou-se melhor do que quando comparado ao caso anterior, porém, ainda se mostra inferior à condição de $a_e = 0,88$ mm. Assim, a média da perpendicularidade dos furos gerados por esta ferramenta foi de $90,5^\circ \pm 0,71^\circ$. A Fig. 7 apresenta a diferença dos desvios gerados entre os dois furos usinados por esta ferramenta.

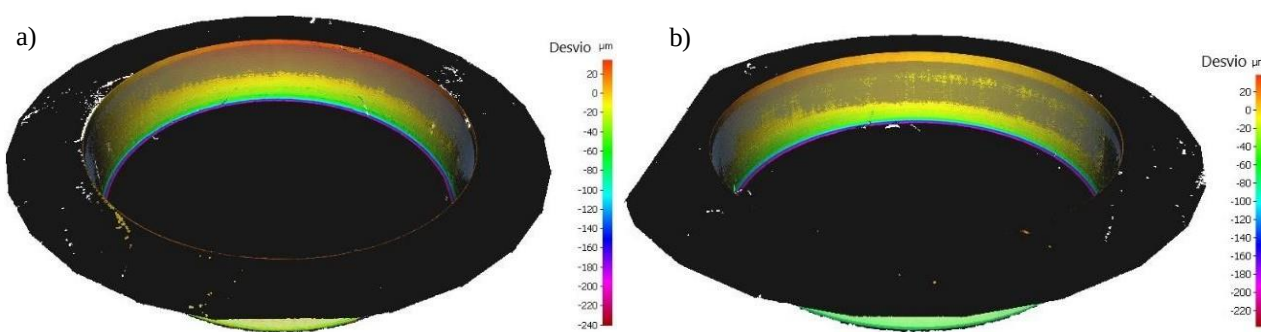


Figura 7. Diferença no desvio de perpendicularidade entre o primeiro (a) e o último furo (b) do quarto ensaio

Desta forma, reduzir o parâmetro a_e pela metade mostrou não ser uma saída viável para melhorar a perpendicularidade geométrica dos furos, uma vez que nesta condição os resultados foram consideravelmente inferiores ao parâmetro anteriormente utilizado.

Em termos de relevância do estudo, pode-se dizer que os dados obtidos possuem grande importância no campo de estudos voltados a furos cegos, pois os resultados obtidos servirão de base para futuros estudos, além da variação de parâmetros mostrar diferentes comportamentos durante a usinagem. Dentre os resultados acima apresentados, destaca-se a usinagem com o parâmetro $a_e = 0,88$ mm com velocidade de avanço da mesa de 100 mm/min, avanço no eixo z de 80 mm/min e 5 000 rpm, onde, a média de perpendicularidade gerada nos quatro furos que fora possível usinar foi de $90,05^\circ$, extremamente próximo da meta de 90° , recomendada pela norma ASTM E837.13a (2013).

Quando comparado com outras bibliografias, Blödorn (2018), por exemplo, fez uso de ferramentas e parâmetros próximos aos deste trabalho, porém, em escala 4 vezes reduzida (diâmetro e profundidade). Em seus estudos, no mesmo material usinado, obteve resultados satisfatórios, mas levemente inferiores em questão de perpendicularidade dos furos, onde a média deste valor neste material foi de 89,7°.

Em outra oportunidade, Blödorn (2016) realizou a usinagem de furos cegos utilizando fresas odontológicas auxiliadas por uma turbina pneumática para aumento da rotação da ferramenta. Em seus estudos, o autor pôde analisar que as ferramentas em questão introduziam às geometrias dos furos pequenos raios em suas extremidades inferiores, como pode ser observado na Fig. 8, com isso, o autor concluiu que este modelo de ferramenta não é capaz de atender as especificações da norma vigente para a usinagem de furos cegos para medição de tensões residuais.

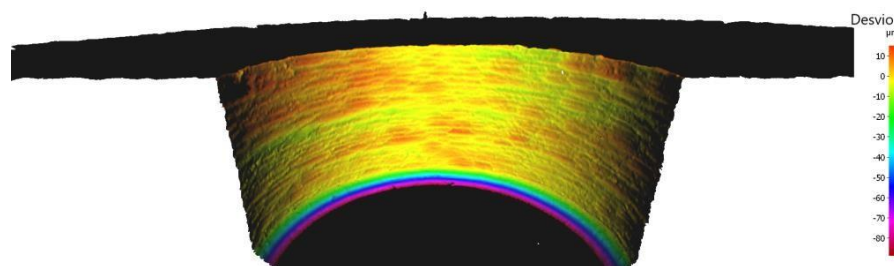


Figura 8. Geometria do furo cego quando utilizadas fresas odontológicas para a usinagem

Para fins de comparação entre métodos, a Fig. 9 mostra a diferença gerada na geometria de dois furos cegos quando o primeiro (a) utilizou fresas de topo reto (primeira análise do presente trabalho) e o segundo (b) utilizou fresas odontológicas.

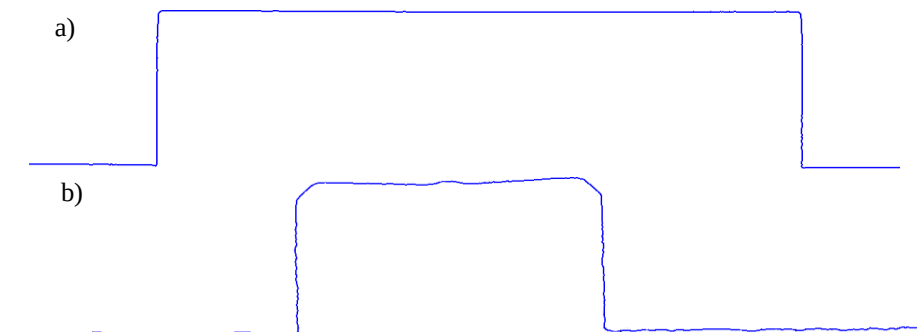


Figura 9. Diferença no perfil da geometria após a usinagem utilizando fresa de topo reto (a) e fresa odontológica com turbina pneumática (b)

5. CONCLUSÕES

As modificações de parâmetros que foram feitas ao longo dos ensaios mostraram que a velocidade de avanço tem maior influência que a velocidade de corte dentro da faixa de parâmetros utilizada, visto que as maiores mudanças nos ensaios ocorreram com as alterações nos parâmetros de avanços.

Dentre os cenários analisados, conseguiu-se obter boas relações de desgaste de ferramentas, onde, chegou-se a ter fresas capazes de usinar quatro, três, dois e um furo(s), que para o objetivo em questão, são boas quantidades de usinagem alcançadas. Assim, o parâmetro analisado de maior confiabilidade foi quando se utilizou avanço da mesa de 100 mm/min, avanço do eixo z de 80 mm/min e 5 000 rpm com o parâmetro de incremento lateral a_e de 0,88 mm, além de ar comprimido para auxiliar o resfriamento e o escoamento de cavaco. Este parâmetro, além de usinar 4 furos com a mesma fresa, teve os melhores resultados de perpendicularidade entre o fundo e as paredes do furo.

Tratando de perpendicularidade da geometria dos furos, alguns parâmetros não obtiveram resultados expressivos durante as pesquisas, porém, particularmente em um caso, a geometria média dos furos usinados por uma ferramenta ficou apenas 0,05° acima do que a norma vigente estabelece, resultado que pode ser considerado de enorme expressão.

Quando comparado com outros métodos de usinagem de furos cegos, a técnica empregada neste trabalho mostrou ser de alta confiabilidade. Por exemplo, Blödorn (2018) analisou, dentre outras caracterizações, a usinagem de furos cegos com brocas odontológicas em altíssimas rotações (cerca de 220 000 rpm) sendo acionadas por uma turbina pneumática. Nestas condições, para o mesmo material de corpo de prova, os resultados alcançados pelo autor foram de $-0,23^\circ$ de erro na perpendicularidade do fundo dos furos usinados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E837-13a. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**. West Conshohocken, 2013. 17 p.
- BLÖDORN, Rodrigo. **AVALIAÇÃO DA FURAÇÃO ORBITAL COM FRESA DE TOPO E FURAÇÃO EM CHEIO COM BROCA HELICOIDAL NA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL PELO MÉTODO DO FURO CEGO**. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- BLÖDORN, Rodrigo. **Efeito do fresamento orbital com fresa de topo e furação em cheio com broca helicoidal sobre os valores medidos da tensão residual pelo “Método Do Furo Cego”**. 2018. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- JUSTUS, K.M. **Avaliação do processo de usinagem eletroquímica para obtenção de furos visando a medição de tensões residuais pelo Método do Furo Cego**. 1999. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- MATHAR, J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes. **Transactions ASME**. v. 56, n. 4, p. 249–254. 1934.
- SCHAJER, G.S. **Practical Residual Stress Measurement Methods**. 1. ed. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 328 p.
- SCHAJER, Gary S.; WHITEHEAD, Philip S.; **Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses**. Morgan & Claypool, 2018. 188 p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATION OF BLIND HOLES GEOMETRY IN ORBITAL MILLING TO MEASURE RESIDUAL STRESSES WITH END MILLS

Jônatas Juliano Verwiebe

Rodrigo Blödorn

Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, Dorval Luz St., 123 – Santa Catarina – CEP: 88352-400 – Brusque/SC – Zip code: 1501

jonatas.verwiebe@gmail.com; rodrigoblodorn@unifebe.edu.br

Abstract. *With the continuous human need to build bigger and better structures, it is of great importance to measure the residual stresses inside them, in order to avoid structural failures. There are several ways make these analyzes, among them, the Blind Hole Method has become an important form of analysis due to its ease of execution, low cost and precision of the results, since other techniques have limitations in reaching the geometry established by norm for this type of hole. This work aims to analyze the geometry of blind holes machined commonly in the analysis of residual stresses, where it seeks to meet the current standard (ASTM E 837-13a, 2013). For this analysis, the blind hole machining method used was orbital incremental milling with different depth, diameter and lateral cutting increments (0.88 and 0.44 mm), maintaining the maximum z/d ratio 0.250, where z is the depth and d the diameter of the hole. The rotation parameters of 5,000 rpm were used, with feed rates of the table and the vertical axis varying between 60 and 100 mm / min, in a machining center Romi D600, with end mills being used for machining. 4 mm in diameter, made of carbide and coated with TiSiN, in addition to analyzing the use of compressed air as a cooling method and source of aid for the flow of chips. In this scenario, greater increments of cut proved to be useful in the formation of the hole geometry*

Keywords: *Machining. Geometry. Blind Hole. Machining parameters.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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