

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM NO FRESAMENTO INCREMENTAL ORBITAL DE FUROS CEGOS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Jônatas Juliano Verwiebe

Clarianne Natali Campos

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. R. Eng. Agron. Andrei Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900.
jonatas.verwiebe@gmail.com; clarianne.campos@gmail.com; rolf.schroeter@ufsc.br

Rodrigo Blödorn

Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE. Rua Dorval Luz, 123 - Santa Terezinha, Brusque - SC, 88352-400.
rodrigoblodorn@unifebe.edu.br

Resumo: Com as constantes necessidades de melhorias estruturais e maiores vidas de máquinas e equipamentos, torna-se de grande importância a medição das tensões residuais presentes nestes, visando evitar falhas estruturais em solicitações dinâmicas. Dentre as inúmeras possibilidades de realizar estas análises, o Método do Furo Cego (MFC) tornou-se uma importante forma de avaliação 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. Assim, este trabalho visa encontrar um cenário adequado de parâmetros e geometria de ferramentas para a usinagem de furos cegos para medição de tensão residual em materiais endurecidos, onde busca-se atender a norma vigente - ASTM E 837-13a (2013). Para tal execução, o método de usinagem do furo cego utilizado foi o fresamento incremental orbital (FIO) com variação nos incrementos de profundidade e parâmetros de usinagem. Utilizou-se os parâmetros de rotação de 9 900 e 8 000 rpm, com velocidades de avanço da mesa e do eixo vertical variando entre 40 e 120 mm/min e velocidades de corte de 31,1 e 25,1 m/min, em um centro de usinagem Romi D600, sendo que para a usinagem utilizou-se fresas de topo reto de 1 mm de diâmetro, fabricadas em metal-duro revestidas com AlTiSiN, TiSiN e AlTiN. Neste cenário, os parâmetros empregados apresentaram certa variação, porém, os resultados foram satisfatórios ao considerar as dificuldades intrínsecas ao caso estudado, sendo que foram alcançados ótimos resultados de geometria dos furos, vida de ferramenta e geração de rebarba, com a velocidade de corte de 25,1 m/min e revestimento AlTiN com os resultados mais expressivos.

Palavras-chave: Método do Furo Cego; Tensões Residuais; Materiais Endurecidos; Fresamento Incremental Orbital.

1. INTRODUÇÃO

Em sua grande maioria, os componentes mecânicos, independentemente de tamanho ou forma, estão sujeitos a sofrerem tensões mecânicas devido a possíveis cargas externas ou em função de descontinuidades da rede cristalina do material, por exemplo. Para Schajer (2013), o resultado de um demasiado acúmulo destes carregamentos em metais pode acarretar em falhas de componentes mecânicos. Este fato pode ser facilmente visto no âmbito mecânico, pois estas tensões residuais se somam às tensões de trabalho, ultrapassando assim a tensão limite de escoamento do material.

As tensões residuais são definidas como as tensões existentes na microestrutura dos materiais e que são resultantes de algum processo anterior, seja este de usinagem, soldagem, conformação ou qualquer outro processo que modifique sua estrutura externa (processos de fabricação) ou interna (através de grande aumento de temperatura, por exemplo).

Para Schajer (2013), o conhecimento do campo de estado de tensão residual é extremamente importante, sobretudo com relação à segurança e prevenção de falhas. Qualquer equipamento mecânico pode se danificar e comprometer sua função quando a composição das tensões residuais e as de operação ultrapassarem os limites de escoamento do material.

Schajer (2013) apresenta em sua obra, conforme Fig. 1, os principais exemplos encontrados na área de engenharia referente às formações de tensões residuais de acordo com suas principais aplicações. Na imagem citada, o autor traz as principais fontes que originam as tensões residuais em processos industriais, como a soldagem, tensões de origem térmica, carregamento e entre outras.

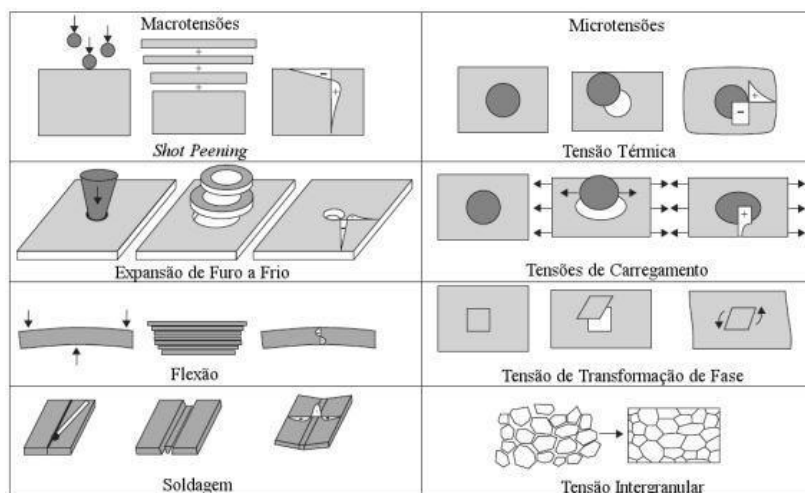


Figura 1. Origem das tensões residuais (Schajer, 2013).

As tensões residuais podem ser de tração ou de compressão, podendo a camada afetada ser superficial ou profunda, dependendo das características do processo de manufatura. A tensão residual de compressão pode estar na superfície e a de tração logo abaixo da superfície ou vice-versa.

Ainda, estas tensões podem ser favoráveis no estado compressivo, pois, de acordo com Schajer e Whitehead (2018), as tensões residuais de compressão são geralmente preferíveis às de tração. Esta preferência se dá pelo aumento da 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 quando estas são somadas ao carregamento externo.

Segundo Schajer (2013), um método capaz de mensurar esse estado de tensões, empregado em larga escala mundialmente e que possui alta confiabilidade é o Método do Furo Cego (MFC). 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 estratégia de medição de tensão residual conhecida por Fresamento Incremental Orbital (FIO), desenvolvida por Blödorn (2018), é uma variante moderna do MFC, em que é realizada a usinagem do furo cego em diversos incrementos, em que o diâmetro e a profundidade do furo aumentam simultaneamente, trazendo inúmeros benefícios ao processo, como a redução dos danos metalúrgicos ao corpo de prova provenientes de mecanismos térmicos e mecânicos, além de ser possível eliminar o cavaco da região usinada com maior facilidade.

Esta técnica consiste na realização de um pequeno furo cego na superfície do material. A remoção deste volume de material localizado na peça faz com que ocorra uma redistribuição de tensão em torno do furo. Esta redistribuição causa deformações na superfície adjacente ao furo cego e, a partir destas deformações, com a utilização de extensômetros ou métodos ópticos, é possível determinar a tensão residual presente no material (Schajer e Whitehead, 2018).

Dado este contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo prático que encontre um cenário ideal de parâmetros e condições que favoreçam a usinagem, por fresamento orbital, de furos cegos em materiais endurecidos (aço AISI D2, com aproximadamente 60 HRC). Esta combinação visa obter ter furos cegos com geometria isenta de rebarbas, e também visando o aumento da vida em uso das fresas empregadas.

Devido ao fato do material dos corpos de prova serem de elevada dureza, optou-se pelo uso da técnica FIO nesta pesquisa, pois esta técnica permite, segundo a literatura analisada, condições que favorecem a usinagem destes materiais quando comparadas ao método tradicional de furação em cheio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos experimentos foram utilizadas fresas de topo reto de metal-duro revestidas por TiSiN, AlTiSiN e AlTiN, com dois e quatro gumes de corte, diâmetro 1,00 mm e comprimento de 50 mm. Estas, por sua vez, foram caracterizadas geometricamente, com o intuito de dimensionar suas grandezas como: ângulo de incidência, ângulo de saída e ângulo de cunha. As fresas empregadas e obtidas por fornecedores A, B e C apresentaram ângulo de cunha de $(70,00 \pm 0,18)^\circ$, $(72,50 \pm 0,44)^\circ$ e $(68,00 \pm 0,41)^\circ$, respectivamente; ângulo de incidência de $(25,00 \pm 1,12)^\circ$, $(16,00 \pm 1,38)^\circ$ e $(19,00 \pm 0,55)^\circ$, respectivamente, e ângulo de saída de $(15,00 \pm 1,38)^\circ$, $(16,60 \pm 0,98)^\circ$ e $(18,00 \pm 0,86)^\circ$, respectivamente, e estão dispostas na Fig. 2 com referências aos diferentes fabricantes que foram analisados nestes ensaios.

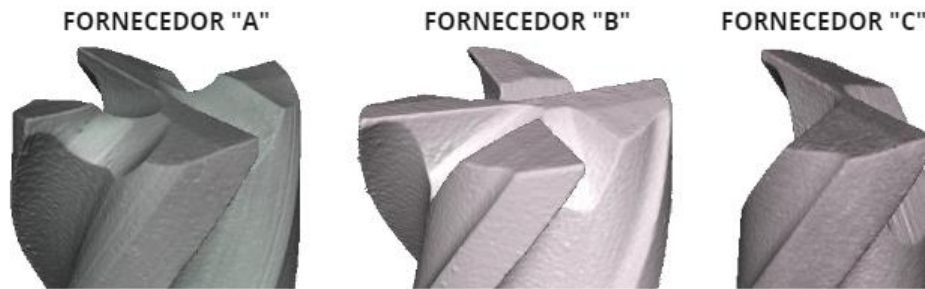


Figura 2. Diferentes geometrias utilizadas nos ensaios.

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

Os corpos de prova utilizados nos ensaios são discos de aço D2, com dimensões de 150 mm de diâmetro, tendo principalmente em sua composição ferro, carbono (1,6%), cromo (12%) e manganês (0,4%), além de ser caracterizado por sua alta dureza e elevada resistência ao desgaste, associada à mediana tenacidade. Os corpos de prova empregados nos ensaios possuem dureza de 60 HRC.

Os ensaios de fresamento orbital foram realizados em um centro de usinagem vertical ROMI D600, disponível no NTIF do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBC. 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 x 500 mm, torre porta-ferramenta com 12 posições e comando numérico Siemens. A fixação dos corpos de prova na mesa da máquina foi realizada por meio de uma morsa hidráulica. As ferramentas utilizadas nos testes foram fixadas na pinça da máquina, sendo que houveram 15 mm de balanço entre a extremidade da ferramenta e o final da fixação.

O fresamento incremental orbital empregado durante os ensaios realizou a usinagem de furos cegos de maneira incremental, onde o valor do diâmetro do furo iniciou com o mesmo da fresa, 1,00 mm. Aumentando o diâmetro gradativamente ao longo da usinagem com os parâmetros apresentados em cada ensaio, o processo de usinagem terminou com diâmetro do furo de 2,00 mm e profundidade final de 0,02 mm.

Conforme detalhamento na seção posterior, os ensaios foram realizados com 1 incremento de profundidade (de 0,02 mm) ou 2 incrementos (dois de 0,01 mm), obtendo-se a profundidade final do furo de 0,02 mm. Os parâmetros de usinagem empregados neste trabalho foram estabelecidos como sendo: velocidade de rotação da ferramenta de 9 900 e 8 000 rpm e velocidades de avanço entre 40 e 120 mm/min, com as velocidades de corte que variaram entre 25,1 e 31,1 m/min. Por último, o parâmetro de incremento lateral de corte (a_e) empregado foi de 0,5%, 2,5% e 5% do valor do diâmetro da fresa como incremento lateral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assim, serão testados neste tópico parâmetros de usinagem, tais como velocidade de avanço v_f , incrementos de profundidade, velocidade de rotação da ferramenta n , sentido da rotação e incremento lateral de corte a_e . Na Tab. 1 estão apresentadas as fresas que foram utilizadas na primeira bateria de ensaios.

Tabela 1. Dados dos ensaios com os dois primeiros cenários analisados.

Parâmetros	Fresa 1	Fresa 2
Rotação (rpm)	9900	8000
Velocidade de corte (mm/min)	31,1	25,1
Velocidade de avanço (mm/min)	60	60
Gumes	2	2
Incremento lateral de corte (a_e) (%)	0,5	0,5
Concordância	concordante	concordante

Revestimento	AlTiSiN	AlTiSiN
Fabricante	C	C
Furos usinados	8	10

Quando comparadas em mesmas quantidades de furos realizados (8), a fresa 2 apresentou menores variações de deformações na superfície usinada, sendo que a única diferença é a velocidade de rotação da fresa. Nota-se neste início de pesquisa que este fator pode impor alterações nos ensaios e pode também ser usado estrategicamente nos ensaios futuros.

No segundo grupo de ensaios, visou-se aplicar outras mudanças nos parâmetros para mais testes de comportamento das ferramentas. Neste momento, além da velocidade de rotação da fresa, foram realizadas várias alterações nas velocidades de avanço (v_f) da ferramenta, a fim de medir o impacto deste parâmetro no modelo de ensaio realizado. Para isso, foram analisadas outras duas ferramentas, conforme Tab. 2.

Tabela 2. Dados do segundo grupo de ferramentas.

Parâmetros	Fresa 3	Fresa 4
Rotação (rpm)	8000	9900
Velocidade de corte (mm/min)	25,1	31,1
Velocidade de avanço (mm/min)	40	80
Gumes	4	4
Incremento lateral de corte (ae) (%)	0,5	0,5
Concordância	concordante	concordante
Revestimento	TiSiN	TiSiN
Fabricante	C	A
Furos usinados	8	4

Neste grupo de ensaios foram analisadas duas fresas, onde as fresas 3 e 4 foram capazes de usinar, respectivamente, 8 e 4 furos, antes de apresentarem grandes danos em sua estrutura por conta da usinagem, sendo visíveis através de imagens de microscópio. A seguir, na Fig. 3, serão analisadas as fresas citadas anteriormente em um mesmo cenário de suas aplicações, onde todas haviam realizado a usinagem de 4 furos.

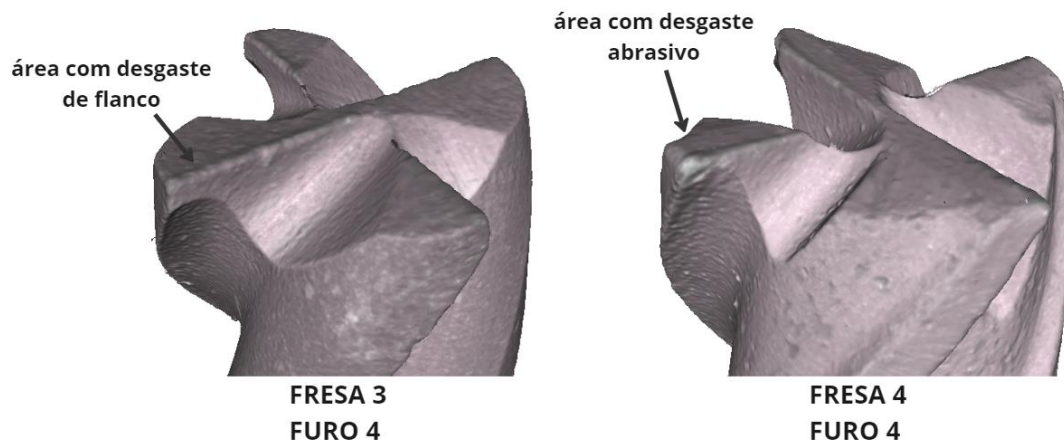


Figura 3. Análise do desgaste das fresas do segundo grupo de ensaios.

Pode-se observar que a fresa 3, após a usinagem do 4º furo, estava em ótimas condições, sendo que podem ser notados apenas leves desgastes por abrasão em sua superfície. Nesta ferramenta destaca-se a utilização experimental de 40 mm/min de avanço da mesa da máquina e a usinagem de 8 furos nestas condições até o momento em que a ferramenta passou a apresentar um demasiado desgaste de flanco.

Com a aplicação das alterações de aumentar a velocidade de corte e o avanço da mesa, a fresa 4 foi capaz de usinar apenas 4 furos, sendo que no quarto furo vários danos foram verificados. O fato de ter usinado menos furos do que a fresa anterior, pode ser creditado ao menor ângulo de saída que esta fresa apresenta em relação à outra, sendo que esta variação foi de aproximadamente 3°, após medições através do *software* do ALICONA®. Segundo Câmara (2008), ângulos menores de saída tendem a gerar maiores danos à ferramenta do que em ângulos maiores, devido ao escoamento do cavaco gerar maior contato dos mesmos com a ferramenta, em menores ângulos de saída.

Aqui foi encerrada a utilização das ferramentas adquiridas pelo fornecedor chamado de “C”. As ferramentas deste fornecedor apresentaram boa relação de vida, sendo possível a usinagem de uma boa quantidade de furos, porém, em análises das geometrias dos furos, sendo estas análises realizadas através do *software* do ALICONA®. Estas ferramentas apresentam-se inferiores em relação às demais.

Foram realizados até agora ensaios com o mesmo padrão de descida da ferramenta, onde a mesma se posicionava na altura determinada para o processo (0,02 mm) e executa o processo de usinagem orbital do furo. Porém, as próximas três ferramentas que foram empregadas na sequência possuem algumas alterações neste parâmetro e também no percentual de abertura do helicóide ao longo do processo de fresamento orbital.

Para iniciar esta terceira bateria de ensaios práticos com variações de parâmetros, destaca-se que as fresas na sequência são chamadas pelos seus respectivos números da ordem de utilização, sendo elas: 5, 6 e 7, conforme Tab. 3.

Tabela 3. Dados do terceiro grupo de ferramentas.

Parâmetros	Fresa 5	Fresa 6	Fresa 7
Rotação (rpm)	9900	9900	9900
Velocidade de corte (mm/min)	31,1	31,1	31,1
Velocidade de avanço (mm/min)	100	120	120
Gumes	4	4	4
Incremento lateral de corte (a_e) (%)	0,5	2,5	2,5
Incrementos de profundidade	2	2	1
Concordância	concordante	concordante	concordante
Revestimento	TiSiN	TiSiN	TiSiN

Fabricante	A	A	A
------------	---	---	---

Iniciando com a fresa de número 5, foi empregado ao longo do ensaio a velocidade de rotação da fresa (n) 9900 rpm, elevando também a velocidade de avanço para 100 mm/min, maior valor deste parâmetro até aqui. Além disso, a fresa tem 4 gumes e o valor de a_e (0,5%) foi o mesmo adotado nos ensaios anteriores.

Assim, a maior mudança que se vê neste cenário (além do aumento da velocidade de avanço) é a mudança na quantidade de incrementos na profundidade do furo usinado. Neste ensaio, a profundidade do furo foi usinada em duas partes, onde na primeira a fresa desceu até a altura de 0,01 mm abaixo da superfície e usinou todo o diâmetro de maneira helicoidal, após isso, a mesma se movimentou até a profundidade de 0,02 mm abaixo da superfície e realizou o restante da usinagem.

Nestas condições expostas, o furo usinado apresentou, visualmente, alta rugosidade e imperfeições na sua base (como picos e vales, por exemplo), sendo que suas paredes registraram bastante deformação e rebarbas ao longo de sua superfície.

Nos ensaios envolvendo a fresa número 6, foram respeitados os mesmos parâmetros de corte e de incrementos de profundidade de usinagem, porém, foi alterada a velocidade de avanço (v_f) de 100 para 120 mm/min e o incremento lateral de corte passou a ser de 2,5% do diâmetro da fresa.

Assim, observou-se, através de imagens, maiores danos causados à ferramenta em relação ao ensaio anterior, muito por conta da velocidade de avanço superior que se mostrou inadequada para este ensaio, sendo que o choque mecânico foi o principal fator deste desgaste prematuro, muito por conta do alto impacto causado pela elevada velocidade de avanço. Porém, a qualidade do furo foi extremamente alta neste ensaio, sendo evidenciadas pouquíssimas incidências de rebarba ao longo da geometria usinada.

Visto isso, esta alteração na velocidade de avanço foi prejudicial para a longevidade na vida da ferramenta, mas acabou gerando boa qualidade dimensional da geometria neste ensaio. Um fato ligado a isto é a questão de a ferramenta ter pouco tempo de contato com a peça, supondo que as temperaturas alcançadas no processo foram relativamente menores, contribuindo para menores deformações intrínsecas ao processo, pois, segundo König *et.al* (1984), na usinagem de precisão com materiais endurecidos é de grande complexidade alcançar-se geometrias de alta precisão, devido principalmente aos efeitos térmicos relacionados ao processo.

Com isso, ao iniciar os procedimentos com a fresa número 7, foi realizada apenas uma alteração nos parâmetros empregados, sendo que o furo foi novamente usinado em um único incremento de profundidade, mantendo todas as outras configurações idênticas ao ensaio anterior.

A geometria usinada e qualidade encontrada no furo realizado pela fresa 7 foi, sem dúvidas, bem abaixo do esperado. Foram encontradas muitas deformações ao longo de toda a geometria usinada, além de bastante rebarba gerada no contorno do furo. Não houveram alterações perceptíveis em relação ao desgaste desta ferramenta com o ensaio anterior (através das imagens de microscópio).

A seguir, na Fig. 4, temos uma representação das geometrias geradas pelas três fresas utilizadas nesta terceira etapa de usinagem, onde são apresentados os furos com destaque para a geometria gerada e formação de rebarbas.

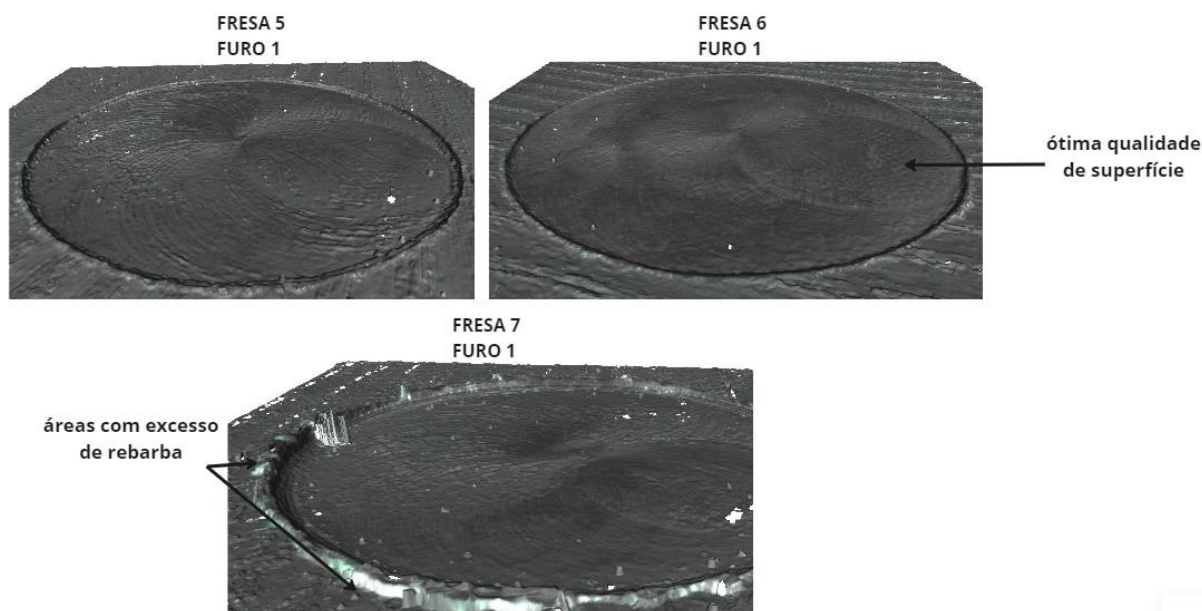


Figura 4. Geometrias encontradas na terceira fase de ensaios práticos.

Nos dois próximos ensaios, fresas 8 e 9, foram empregadas algumas mudanças em relação aos ensaios anteriores, como pode-se perceber pela Tab. 4.

Tabela 4 - Dados dos ensaios do quarto conjunto de ferramentas.

Parâmetros	Fresa 8	Fresa 9
Rotação (rpm)	9900	9900
Velocidade de corte (mm/min)	31,1	31,1
Velocidade de avanço (mm/min)	60	60
Gumes	4	4
Incremento lateral de corte (a_e) (%)	5	5
Incrementos de profundidade	1	1
Concordância	concordante	discordante
Revestimento	AlTiN	AlTiN
Fabricante	B	B

Conforme elencado na tabela acima, ambas as ferramentas deste quarto grupo de ensaios produziram furos cegos em apenas um incremento de profundidade, com 0,02 mm, e com velocidade de avanço em 60 mm/min. Assim, a diferença entre os ensaios foi o sentido de rotação das ferramentas, onde para a fresa 8 foi utilizado o sentido concordante e, para a fresa 9, o sentido discordante. Em ambas as situações, as ferramentas foram capazes de usinar apenas dois furos cada, até que apresentassem excesso de danos em suas estruturas. Nos dois ensaios, notou-se grande perda de material por lascamento dos gumes das ferramentas, quando comparado aos ensaios anteriores.

Este lascamento mais acentuado das fresas 8 e 9 pode ser devido ao maior percentual de incremento lateral da fresa (5%) por rotação do que quando comparado com a maioria dos ensaios anteriores (0,5% e 2,5%), aliado com um avanço consideravelmente baixo, o que pode ter acarretado neste desgaste prematuro.

No primeiro furo da fresa 8, a geometria apresentou pouca rebarba gerada e superfície do fundo do furo isenta de formação de rebarba e imperfeições ao longo da geometria, sendo uma das melhores condições de usinagem até o presente momento, porém, no segundo furo com a ferramenta, o mesmo apresentou grande deformação ao longo de toda a superfície, excesso de rebarba e também notadamente um elevado degrau ao longo da intersecção do fundo do furo com a parede, deixando visível que houve de fato o lascamento das pontas da ferramenta nesta etapa de ensaio.

Analisando as geometrias geradas pela fresa número 9, o primeiro furo apresentou qualidade superficial regular, com geração de uma grande quantidade de rebarba ao longo de toda a borda do furo. No segundo furo, a geometria e acabamento da superfície do fundo do furo se mostrou isenta de deformações, porém, as laterais do furo e sua superfície superior foram inteiramente tomadas por rebarbas e deformações. Estas análises referentes aos furos das fresas 8 e 9 podem ser visualizadas na Fig. 5. Nesta imagem estão destacadas as formações de rebarbas e degraus que se mostraram ao longo destas análises.

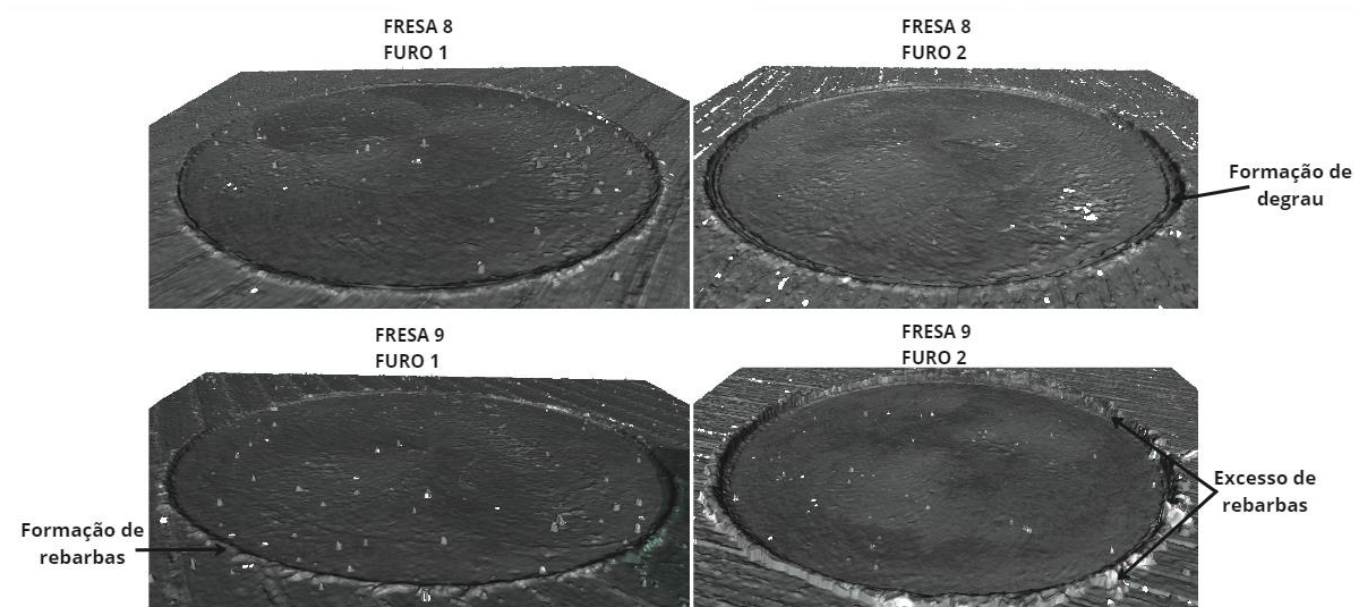


Figura 5. Geometrias encontradas utilizando as fresas 8 e 9.

A partir daí, entendeu-se que haviam dados e parâmetros suficientes para partir para um quinto e último momento de testes, sendo que neste foi analisado o desempenho de uma única fresa, denominada como número 10.

Nesta ferramenta, foi utilizado um grupo de parâmetros que se mostraram bastante adequados para estas análises, sendo avaliado apenas o sentido de concordância da ferramenta, onde ao longo dos 16 furos usinados com esta mesma ferramenta, foi realizado uma alternância entre sentido concordante e discordante, para encontrar assim, o melhor cenário. Abaixo, na Tab. 5, estão apresentados os parâmetros empregados na utilização desta ferramenta.

Tabela 5. Dados dos ensaios do quarto conjunto de ferramentas.

Parâmetros	Fresa 10
Rotação (rpm)	8000
Velocidade de corte (mm/min)	25,1
Velocidade de avanço (mm/min)	120
Gumes	4
Incremento lateral de corte (a_e) (%)	5
Incrementos de profundidade	1
Concordância	ambos
Revestimento	AlTiN
Fabricante	B

Esta ferramenta apresentou, sem dúvidas, o melhor desempenho entre todas as ferramentas empregadas até aqui, muito em decorrência da *expertise* adquirida ao longo de todos os ensaios e grupos de parâmetros empregados e testados anteriormente.

Este é um ensaio muito importante para o andamento da pesquisa, visto que, aparentemente, foram encontrados os parâmetros de usinagem ideais para o cenário em questão, e este teste será determinante para analisar a viabilidade do sentido concordante ou discordante para a sequência dos ensaios.

Abaixo, na Fig. 6, apresenta-se em detalhes o resultado encontrado em cada um dos 16 furos usinados por esta ferramenta. Nesta avaliação apresentada graficamente, avaliou-se cada um dos 8 furos empregados em cada sentido de concordância da ferramenta. Os critérios de avaliação de cada furo usinado levaram em consideração a formação de rebarbas, dimensões geométricas alcançadas e deformações na região usinada, sendo que a pontuação para cada furo vai de zero à dez (onde as melhores condições alcançadas foram classificadas como nota máxima, e as condições inferiores, com valores menores).

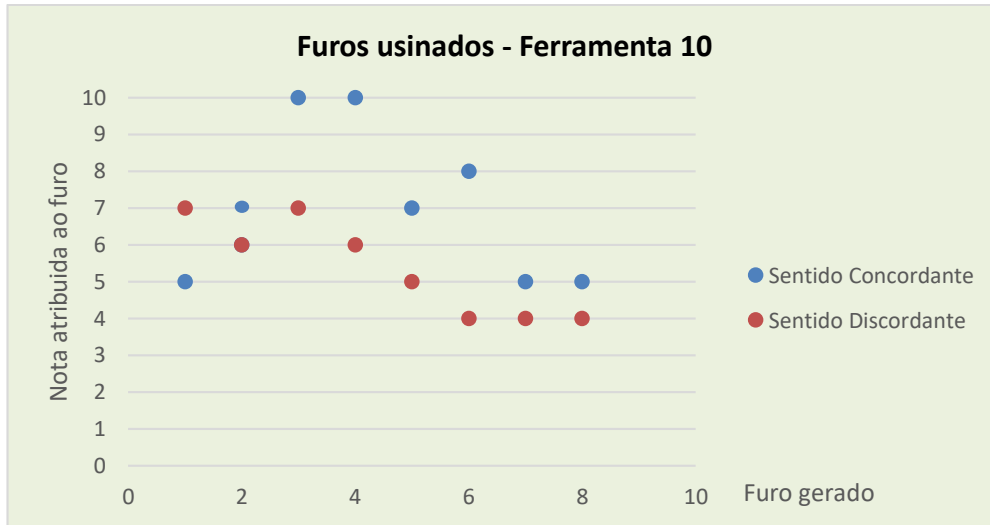


Figura 6. Classificação da usinagem dos furos com a fresa 10.

Nestas condições, foram encontrados os melhores resultados quando foi empregado o sentido concordante durante os testes, sendo que alguns destes furos foram os melhores encontrados dos ensaios. A seguir, na Fig. 7, é feita uma comparação entre os furos 5 e 6 realizados por esta ferramenta, onde foram empregados sentidos concordantes e discordantes, respectivamente.

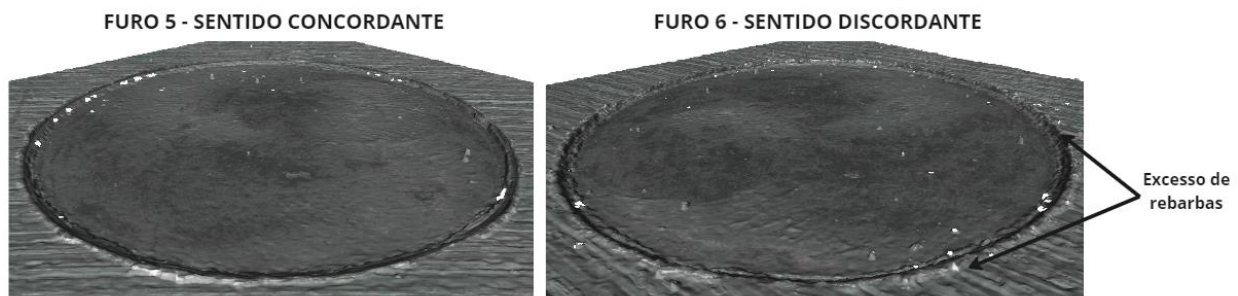


Figura 7 - Comparação entre os furos em sentidos distintos, com os mesmos parâmetros.

Através da imagem da Fig. 7, é visível a diferença de qualidade de geometria encontrada nestes dois parâmetros analisados. Na imagem da direita (sentido discordante), nota-se a presença de uma grande quantidade de rebarba ao longo da borda do furo. Na esquerda (sentido concordante), a geometria encontrada é perceptivelmente mais limpa e de qualidade superior ao cenário comparado.

Sendo assim, obteve-se ótimos cenários e parâmetros para a usinagem de furos cegos através do fresamento incremental orbital. Conforme citado por Iyer, Koshy e Ng (2006), a técnica do fresamento orbital é capaz de usinar furos com excelentes geometrias, onde no caso dos autores, usinou-se furos com especificação H7 para um segmento industrial.

4. CONCLUSÕES

Percebeu-se ao longo dos ensaios que elevadas velocidades de avanço da ferramenta, aliada com baixos valores de incremento lateral de corte (a_e), causam demasiado desgaste da ferramenta, sendo que estes fatores também se atrelam à formação de rebarba ao longo da geometria do furo.

Foram testados também diferentes incrementos de profundidade, onde em muitos cenários testou-se o fresamento incremental orbital em uma única profundidade, sendo que a ferramenta nestes casos, desceu até a altura determinada e

realizou a usinagem do diâmetro almejado. Ao analisar outros cenários com incrementos parciais de profundidade, notou-se que este cenário acabou afetando a vida da ferramenta e gerou pouca ou nenhuma melhora na geometria dos furos. Isto deve-se pelo fato de se tratar de uma microusinagem, onde os incrementos são extremamente baixos.

No cenário dos diferentes fabricantes analisados, a ferramenta adquirida pelo fabricante intitulado “C” foi o que apresentou piores resultados, sendo que isto acabou fazendo com que as ferramentas deste fabricante fossem logo deixadas de serem empregadas. Os fabricantes chamados neste trabalho “A” e “B”, apresentaram os melhores resultados, sendo que este fator foi um diferencial nas análises. Estes resultados se mostraram através de maiores quantidades de furos usinados por fresa (que será muito importante nos próximos trabalhos) e também pela maior capacidade de produzir furos cegos com características específicas.

Através dos ensaios, encontrou-se os parâmetros de 8.000 rpm para rotação da ferramenta, 120 mm/min para velocidade de avanço e 25,1 m/min de velocidade de corte como os melhores parâmetros para as análises. Além disso, o incremento lateral de corte de 5% se mostrou bastante adequado para o cenário, bem como o sentido de corte concordante.

Viu-se que o parâmetro do ângulo de saída da fresa possui forte influência sobre os danos inerentes ao processo à fresa, onde maiores ângulos de saída mostraram que prolongam a vida da ferramenta, fato este também presente em literaturas analisadas.

Foi possível concluir também que a alteração do sentido de rotação da ferramenta, concordante ou discordante, gera diferentes cenários práticos. No último ensaio, onde uma mesma ferramenta foi empregada para parcialmente gerar furos com o sentido concordante e parte discordante, notou-se que quando o sentido concordante é empregado, a qualidade das geometrias dos furos é superior, com menos rebarba ao longo da geometria e menor rugosidade. Por último, notou-se através dos ensaios que o revestimento AlTiN trouxe os melhores resultados à pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) e apoiado pelo Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE.

6. 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.
- Blödmorn, Rodrigo, 2018. *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*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Câmara, Marcelo Araújo, 2008. *Influência do ângulo de posição sobre o fresamento frontal de níquel puro com insertos de metal duro*. 92 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- Iyer, R.; Koshy P.; Ng, E, 2006. *Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel*. Canada: International Journal Of Machine Tools & Manufacture.
- König, W.; Komanduri, R.; Tonshoff, H. K.; Ackershott, G, 1984. *Machining of Hard Materials*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 417-427.
- Schajer, G.S., 2013. *Practical Residual Stress Measurement Methods*. 1. ed. Reino Unido.
- Schajer, Gary S.; Whitehead, Philip S., 2018. *Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses*. Morgan & Claypool.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

MACHINING PARAMETERS EVALUATION IN ORBITAL INCREMENTAL MILLING OF BLIND HOLES FOR RESIDUAL STRESSES MEASUREMENT

Jônatas Juliano Verwiebe
Clarianne Natali Campos
Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Eng. Agron. Andrei Ferreira St. - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900.
jonatas.verwiebe@gmail.com, clarianne.campos@gmail.com and rolf.schroeter@ufsc.br

Rodrigo Blödorn

Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE, Dorval Luz St., 123 - Santa Catarina - 88352-400.
rodrigoblodorn@unifebe.edu.br

Abstract. *With the constant need for structural improvements and longer lives of machines and equipment, it is of great importance to measure the residual stresses inside them, in order to avoid structural failures. Among the numerous possibilities to carry out these analyses, the Blind Hole Method has become an important form of evaluation due to its ease of execution, low cost and accuracy of results, since other techniques have limitations in achieving the established geometry as a rule for this type of hole. Thus, this work aims to find a suitable scenario of parameters and geometry of tools for machining blind holes for measuring residual stress in hardened materials, where it seeks to meet the current standard - ASTM E 837-13a (2013). For this execution, the blind hole machining method used was orbital incremental milling (FIO) with variation in depth increments and different parameters. The rotation parameters of 9 900 and 8 000 rpm were used, with table and vertical axis feed speeds varying between 40 and 120 mm/min and cutting speeds of 31.1 and 25.1 m/min, in a machining center Romi D600, where machining, straight end mills of 1 mm in diameter were used, made of carbide coated with AlTiSiN, TiSiN and AlTiN. In this scenario, the parameters used showed some variation, however, the results were satisfactory when considering the intrinsic difficulties of the case studied, and excellent results were achieved in hole geometry, tool life and burr generation, with a cutting speed of 25.1 m/min and AlTiN coating with the most expressive results.*

Keywords: *Blind Hole Method; Residual Stresses; Hard Steel; Incremental Orbital Milling.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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