

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec

Maykon Douglas Teixeira

**Influência do comprimento em balanço da fresa
inteiriça de metal duro na qualidade dos furos
usinados**

Orientador: Armando Ítalo Sette Antonialli



São Carlos - SP
2024

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec

Maykon Douglas Teixeira

Monografia

Influência do comprimento em balanço da fresa inteiriça de metal duro na qualidade dos furos usinados

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
São Carlos, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli



São Carlos-SP

2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 42/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

MAYKON DOUGLAS TEIXEIRA

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO EM BALANÇO DA FRESA INTEIRIÇA DE METAL DURO NA QUALIDADE DOS FUROS USINADOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos - Campus São Carlos

São Carlos, 18 de novembro de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 1	Fabricio Tadeu Paziani
Membro da Banca 2	Gustavo Roberto dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **Armando Ítalo Sette Antonialli, Docente**, em 18/11/2024, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Tadeu Paziani, Docente**, em 18/11/2024, às 17:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1645472** e o código CRC **5950C529**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.034909/2024-85

SEI nº 1645472

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Handwritten signature and date: 18/11/24

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus e aos meus pais, pois sem a graça divina e o esforço dos meus pais eu não teria forças para concluir este curso.

AGRADECIMENTO

Como não poderia deixar de ser, primeiramente agradeço a Deus por ter me capacitado e cumprido sua promessa na minha vida. Foi difícil, foi muito difícil, mas mesmo sem entender eu confiei e confio nele que é o senhor todo poderoso.

Em segundo lugar, agradeço muito aos meus pais, por ter me dado o máximo de apoio e suporte emocional que eles puderam. À minha mãe Denise, um exemplo de amor e sabedoria, por sempre me incentivar e dizer o quanto a educação é importante, mesmo não tendo completado o ensino médio até os 48 anos, mas, no momento que escrevo essa dedicatória ela terminou (muito orgulho). Ao meu pai Laercio, um verdadeiro guerreiro, que sempre foi um exemplo de luta e perseverança, e sempre me mostrou o quanto é importante lutar pelos seus objetivos. Agradeço aos membros das famílias Teixeira e Ortiz dos Santos, principalmente aos meus avós, tios e tias, por todo o apoio durante essa jornada, finalmente teremos o primeiro engenheiro na família.

Agradeço à minha companheira Adriele, por toda a parceria, companheirismo, cumplicidade, incentivo e amor oferecidos a mim nos períodos mais difíceis dessa jornada. Com você minha vida ganhou cor.

Agradeço a todos os meus amigos por todo o apoio. Aos amigos de infância, Isaias, Gabriel Coutinho, André Guaraná e Marcos Israel. Aos amigos do cursinho Objetivo de Guarulhos, Alexandre Moreira, Alberto Rebequi, Arthur Folgozzi, Bruno Fazio, Carla Resende, Danilo Veronez Sant'Ana, Joel, Marcelo Makoto, Rodrigo Soares, Thales Bellucci e Victor Ferreira.

Agradeço aos amigos Mauro Nascimento e Giuseppe Della Vittoria por ter me incentivado a estudar enquanto trabalhávamos na Prensal.

Agradeço aos amigos que a cidade de São Carlos me proporcionou, Marcos Brandão, Danilo Leite, Gabriel de Jesus e Guilherme Alves (amigos de república); João Pedro Antunes, Lucas Arroyo, Lucas Varella, Guilherme "Pelon", Gabriel Salomão, Ricardo Campos, Rafaela Almeida e José Albolea, que Deus o tenha meu eterno amigo.

Agradeço ao empresário Daniel Sant'Ana por ter me apoiado em um dos momentos mais cruciais da jornada.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da minha vida, desde a professora

Tessália até os professores da UFSCar. Em especial gostaria de agradecer aos professores Anderson Souza, Paulo, Shirley e Raquel (professores do ensino médio); ao professores James Carvalho (cursinho Objetivo); aos professores Flávio Watanabe, João Fontes e Mariano Moreno (professores da graduação).

Pela orientação, um agradecimento especial aos professores Armando Ítalo Sette Antonialli e Fabrício Tadeu Paziani, por toda a paciência, dedicação e esforço para que este trabalho fosse concluído. Agradeço ao professor Alessandro Roger Rodrigues por toda a ajuda e colaboração.

Agradeço aos técnicos Djalma Durici e Tiago Monteiro Camponucci pela colaboração neste trabalho. Aos laboratórios NuLEEn-UFSCar por ter preparado os corpos de prova e LAMAFE USP por ter cedido o espaço para a execução dos experimentos. Agradeço às empresas Vydenze medical e o operador Leonardo Silva por ter feito as medições dos furos, a OSG Sulamericana na figura do engenheiro Gustavo Santos pelas ferramentas cedidas para a execução deste trabalho e a empresa Villares Metals por fornecer o material usinado.

Por fim, agradeço muito aos projetos de extensão, Engrenar Júnior por ter me oferecido a oportunidade de conhecer pessoas incríveis e aprender muito com elas e à Bateria UFSCAR por ter me proporcionado momentos incríveis durante a graduação.

RESUMO

Mesmo com todo o desenvolvimento tecnológico é impossível fabricar uma peça com medidas exatamente iguais à idealizada em um projeto, em consequência disso, erros são percebidos entre a peça ideal e real. Para que não haja o comprometimento dos componentes de uma máquina ou sistema, os erros foram normalizados dentro de faixas de tolerâncias de acordo com suas dimensões. A furação de peças é amplamente empregada na indústria e apresenta alguns desafios, como a necessidade de múltiplas ferramentas para abertura de furos com diâmetros maiores, aumentando o tempo de trabalho, além de resultar em qualidade de trabalho mediana (IT10 a IT12) e em retrabalho para furos com tolerâncias mais apertadas. No fresamento de moldes e matrizes, a fabricação de furos por interpolação helicoidal vem sendo aplicada como alternativa para superar desafios inerentes à abertura e alargamento de furos. A fim de entender a influência da variação do balanço da ferramenta no processo de abertura de furos por interpolação helicoidal, este trabalho adotou o seguinte procedimento experimental. Foi fixada a velocidade de corte, enquanto foram utilizados dois balanços diferentes para as ferramentas: o primeiro com a relação de comprimento livre da ferramenta sobre o diâmetro da haste de fixação igual a três e o segundo igual a cinco. Em uma máquina de comando numérico computadorizado (CNC), foram usinados corpos de prova de aço ferramenta para trabalho a quente, utilizando ferramentas do tipo fresa inteiriça de metal duro, sem o uso de fluido de corte. Por fim, foram medidos o desgaste da ferramenta, o diâmetro de cada furo e sua circularidade. Após a coleta dos resultados, foi possível concluir que as diferentes condições de balanço impostas ao processo não impactaram no desgaste de flanco das ferramentas ao longo do tempo, com exceção dos dois primeiros furos. As curvas de desgaste de flanco, variação do diâmetro e desvio de circularidade demonstraram tendência de convergência no decorrer do tempo, o que pode ser explicado pela característica de antivibração da ferramenta, conforme especificado no catálogo. Por fim, concluiu-se que a estratégia de abertura de furos utilizada pode ser adotada como alternativa para a usinagem de furos com diâmetros maiores do que o da ferramenta.

Palavras-chave: Fresa de topo em balanço. Fresamento por Interpolação helicoidal. Desgaste de flanco. Desvios dimensionais. Desvio de circularidade.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

Despite significant technological advancements, it remains impossible to manufacture a part with dimensions that match the exact specifications of a design. Consequently, discrepancies are observed between the ideal and actual part dimensions. To avoid compromising the performance of machine components or systems, these dimensional discrepancies have been standardized within tolerance ranges according to specific dimensions. Hole drilling is extensively employed in the industry, yet it presents challenges, such as the need for multiple tools to machine larger-diameter holes, leading to increased production time, as well as resulting in average dimensional accuracy (IT10 to IT12) and requiring rework for holes with tighter tolerances. In mold and die milling, the use of helical interpolation for hole-making has emerged as an alternative to overcome inherent challenges associated with hole opening and enlarging. This study aimed to investigate the influence of tool overhang variation on hole-making through helical interpolation, employing the following experimental procedure. The cutting speed was fixed, while two different tool overhangs were adopted: the first with an overhang ratio (tool free length to tool shank diameter) of three, and the second with a ratio of five. Hot-work tool steel workpieces were machined on a CNC machine using solid carbide end mills without cutting fluid. Finally, tool wear, hole diameter, and hole roundness were measured. The results allowed us to conclude that different conditions imposed on the process did not impact flank wear over time, except for the first two holes. Flank wear curves, diameter variation, and roundness deviation displayed a tendency to converge over time, which can be attributed to the anti-vibration characteristics of the tool, as specified in the manufacturer's catalog. Finally, it was concluded that the hole-making strategy utilized could be adopted as an alternative for machining holes with diameters larger than the tool itself.

Keyword: Overhang endmill. Helical milling. Flank wear. Dimensional Deviations. Roundness Deviation.

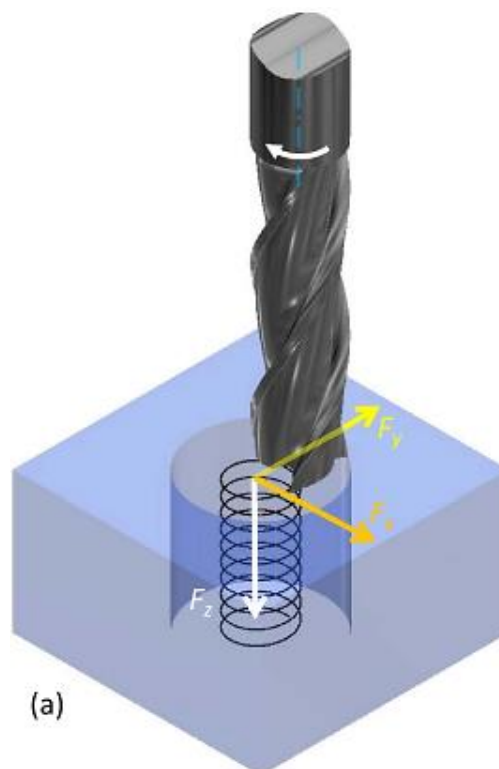
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4. RESULTADOS.....	31
5. CONCLUSÕES.....	34
6. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O fresamento por interpolação helicoidal é um processo de furação e/ ou alargamento de furos na qual a ferramenta percorre uma trajetória em formato de hélice enquanto rotaciona em torno do seu próprio eixo (Figura 1).

Figura 1 – Representação da trajetória percorrida durante o fresamento por interpolação helicoidal



Fonte: Adaptado de Pereira et al.

Agostinho (1977) afirma que, ao longo de processos de fabricação sempre haverá desvios associados às dimensões das peças fabricadas, principalmente quando produzidas em larga escala. Segundo o autor, esses desvios são devidos às condições inerentes ao processo de fabricação durante a operação, como exemplos: a falta de rigidez da máquina ou dispositivo de fixação; desgaste da geometria da parte cortante da ferramenta de corte ou falta de rigidez das peças. Assim, seria bastante oneroso o esforço para se produzir peças com dimensões exatamente iguais às projetadas, resultando em desperdício de tempo e recursos desnecessários.

Como solução para esses desafios, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da norma NBR 6158:2016, propõe que sejam criadas faixas

de tolerâncias normalizadas. Essas faixas permitem atender às funções preestabelecidas, viabilizando a produção de componentes mecânicos de forma mais eficiente e econômica.

Tonshoff, Spintig, König e Neises (1994), afirmam que no processo de usinagem de materiais metálicos o torneamento e a furação correspondem a 25% do tempo de operação e se somados com processos semelhante como alargamento de furo e rosqueamento podem atingir até 33% do processo de fabricação de uma peça. Wang, Qin e Li (2015) vão além, segundo eles, a furação ocupa cerca de 50% do processamento total quando se trata da usinagem.

Apesar de amplamente utilizado na usinagem dos materiais, a furação apresenta uma série de problemas inerentes ao seu processo, sejam eles por tempo gasto de maneira improdutivo ou pelo próprio processo de corte do material. Wenda (2019) diz em seu trabalho que a troca de ferramentas durante o processo de abertura de furos é um dos problemas percebidos, pois o tempo gasto de forma improdutivo durante a preparação da máquina acarreta a diminuição da produção. Isso é ainda mais evidente quando o diâmetro do furo é grande ou quando as tolerâncias dimensionais são apertadas.

Iyer, Koshy e Ng (2007), pontuam que existem desafios técnicos no processo de furação quando comparados com outros processos de usinagem. Os autores destacam que, devido à velocidade de corte no centro da broca ser próxima de zero, a remoção de cavaco nessa região é dificultada e por consequência, o cavaco é retirado de forma equivalente à extrusão em vez de corte. Isso obriga o material sair da peça lateralmente e não pelos canais da ferramenta. Ainda segundo eles, a consequência dessa particularidade é um acréscimo da força de avanço, limitando a produtividade e podendo até levar ao rompimento da peça na saída do canal, transformando-a em refugo. Além disso, a saída de cavaco e a dissipação de calor tornam-se ainda mais difíceis em furos de maiores dimensões, aumentando o atrito e elevando o risco de quebra da broca.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013), destacam que as principais dificuldades encontradas no processo de furação convencional é a remoção dos cavacos do interior do furo. Caso esses cavacos não sejam retirados, podem causar o entupimento do furo, causando um acréscimo do momento torsor sobre a ferramenta e, conseqüentemente, provocando sua quebra, resultando em perda de tempo e, em alguns casos, até mesmo da peça.

Devido a essa série de problemas, o processo de fresamento helicoidal tem sido uma alternativa ao processo de furação trazendo maiores vantagens de processamento principalmente em materiais difíceis de serem cortados (WANG, 2016).

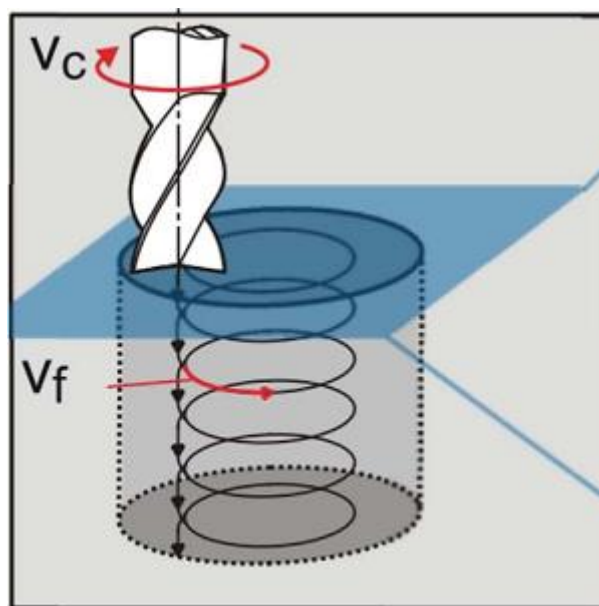
O objetivo deste trabalho é entender o comportamento da fresa quando submetida a relações de balanço diferentes. Além disso, tem a intenção de estudar o desgaste de flanco das ferramentas dadas as condições de balanço diferentes e, em adição, monitorar a influência que o desgaste causou na variação dos diâmetros e no desvio geométrico.

Por fim, o trabalho pode contribuir oferecendo uma estratégia alternativa para a abertura de furos com diâmetros maiores utilizando ferramentas menores sem a necessidade de troca da ferramenta. E com isso, reduzir os desafios enfrentados no processo de furação convencional, como o tempo de usinagem e a qualidade de acabamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme discutido por Pereira, Brandão, Paiva, Ferreira e Davim (2017), o fresamento helicoidal oferece uma abordagem alternativa para a usinagem de furos, trazendo consigo uma série de benefícios em comparação com métodos tradicionais de furação. Denkena, Boehnke e Dege (2008), apresentam um amplo estudo sobre a cinemática envolvida no processo de fresamento helicoidal, através deste trabalho é possível concluir que o processo de fresamento helicoidal pode ser definido pela rotação da ferramenta em seu próprio eixo enquanto percorre um caminho helicoidal em direção ao corpo usinado, como pode ser visto na figura 2. Baixas forças de corte, menor desgaste da ferramenta e melhor qualidade do furo, como tolerâncias mais apertadas, rugosidades mais baixas e menores desvios geométricos podem ser alcançados utilizando esta estratégia de furação.

Figura 2. Representação da trajetória da ferramenta durante o fresamento.



Fonte: Adaptado Denkena et al.

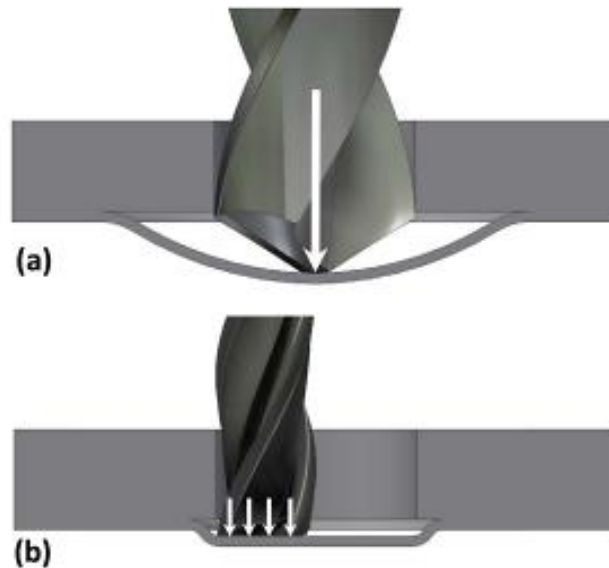
Pereira et al (2017), concluíram que furos obtidos em moldes e matrizes são produzidos por processos tradicionais de furação e que, para obter maior profundidade sobre a aplicação de fresamento helicoidal com foco em moldes e matrizes em aços endurecidos, um estudo mais aprofundado deve ser feito. Além disso, outros aspectos devem ser considerados quando se fala em furação de moldes e matrizes, a saber, para evitar trocas de ferramenta, uma fresa de topo esférica

geralmente deve ser usada na usinagem destes tipos de equipamento. O efeito do comprimento em balanço da ferramenta e da deflexão devem ser estudados e considerados no erro dimensional e geométrico em furos obtidos através do fresamento helicoidal.

Pereira et al. (2017) também concluíram que a qualidade do fresamento helicoidal foi analisada com base em diversos parâmetros, como erro dimensional, circularidade, rugosidade, delaminação, rebarbas, entre outros aspectos. Os resultados obtidos confirmam a eficácia do fresamento helicoidal na produção de furos acabados. A relação entre a força de corte radial e o erro dimensional no fresamento helicoidal foi comprovada. Adicionalmente, foi mostrado que o desgaste do flanco nas arestas de corte periféricas também provocou desvios dimensionais no fresamento helicoidal de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC).

Sadek, Meshreki e Attia (2012), investigaram o impacto do processo de furação orbital (OD), processo semelhante à interpolação helicoidal, causaria na abertura de furos em compósitos de fibra de carbono em comparação à furação convencional (processo de furação utilizando broca). O estudo se baseou nos modelos da mecânica da fratura, que preveem qual a força axial crítica seria necessária para a propagação e delaminação da trinca durante o processo OD. Os autores destacam que um dos fatores que contribuem para uma melhor qualidade dos furos é a redução as forças e temperaturas de corte durante o processo. A redução das forças de corte é motivada pela redistribuição da carga experimentada pelas arestas de corte, contribuindo para a redução das forças axiais e conseqüentemente a diminuição da temperatura. Os autores também pontuam que ao manter as forças de corte abaixo dos limites críticos o risco de delaminação na saída do furo diminui consideravelmente. A figura 3 demonstra uma dentre as diferenças observadas entre a furação convencional com broca e com fresa de topo em um processo de interpolação helicoidal.

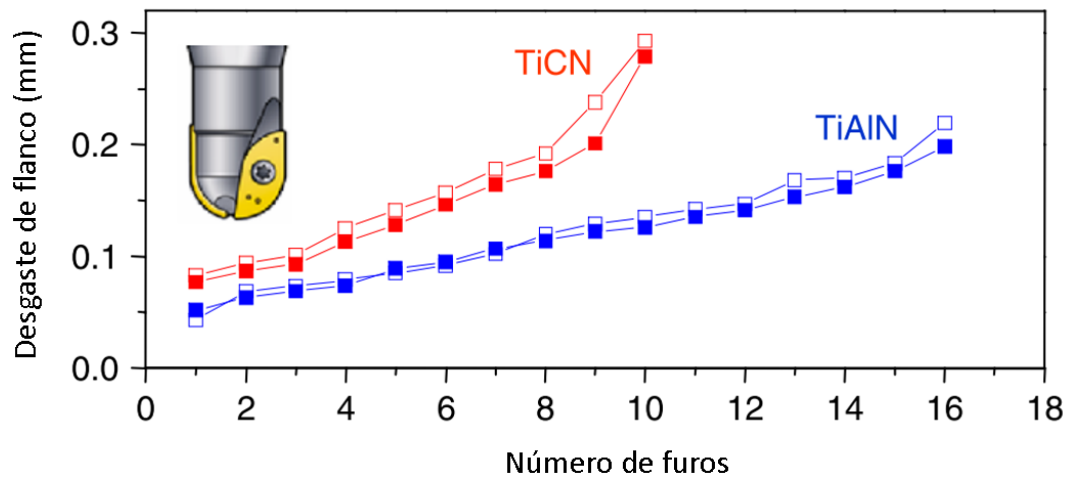
Figura 3. Força axial causando o início da delaminação na saída do furo (a) furação convencional com broca, (b) furação por interpolação helicoidal.



Fonte: Adaptado de Sadek et al.

Em seu trabalho, Iyer et al. (2007) investigaram as consequências de utilização do processo de furação por interpolação helicoidal em aço para ferramentas AISI D2 endurecido, em comparação com a perfuração convencional com broca sem lubrificação. O estudo conclui que a estratégia de fresamento por interpolação helicoidal aumenta em 10 o número de furos feitos com uma mesma ferramenta com pastilhas revestidas com TiCN a uma velocidade de corte de 30m/min e, ainda, 16 furos para uma ferramenta com pastilhas revestidas com TiAlN a uma velocidade de 47m/min. A figura 4 apresenta o resultado experimental da evolução do desgaste de flanco de duas réplicas de cada tipo revestimento das pastilhas, em relação ao número de furos realizados, até atingir o critério de desgaste adotado de 300 μm .

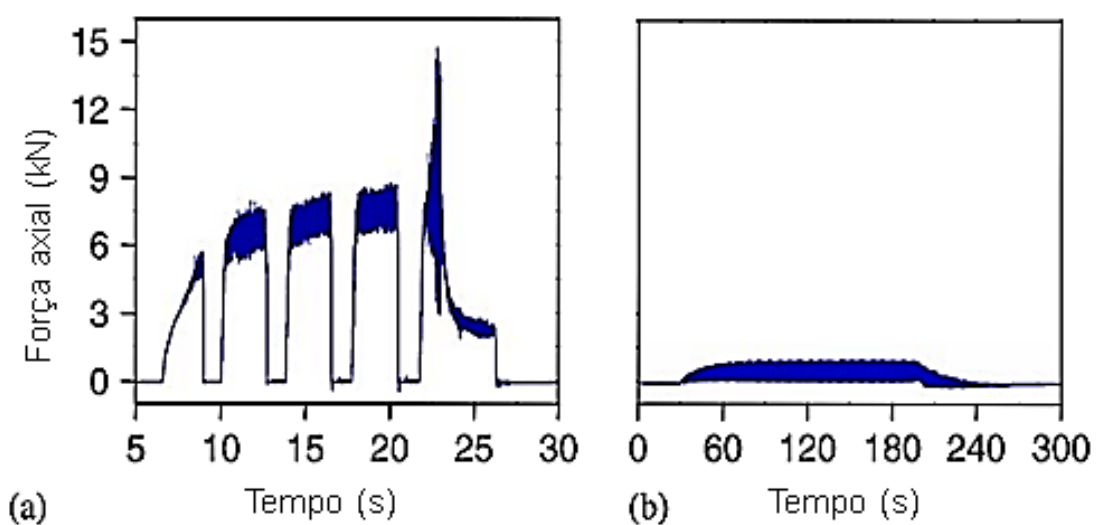
Figura 4. Progressão do desgaste de flanco em ferramentas de ponta esférica com pastilhas intercambiáveis.



Fonte: Adaptado de R. Iyer et al.

Os autores também demonstraram que a força axial máxima, inserido nas forças de usinagem, apresenta uma significativa redução no fresamento helicoidal quando comparado à furação convencional (Figura 5). Essa diferença se deve à menor força necessária para a extrusão do material, além dos ângulos de saída e da ausência de velocidade de corte no centro da ferramenta durante a furação. Essa redução é particularmente relevante em materiais endurecidos, nos quais o fresamento por interpolação helicoidal reduz a probabilidade de falhas catastróficas da ferramenta, melhorando a eficiência e a qualidade do processo.

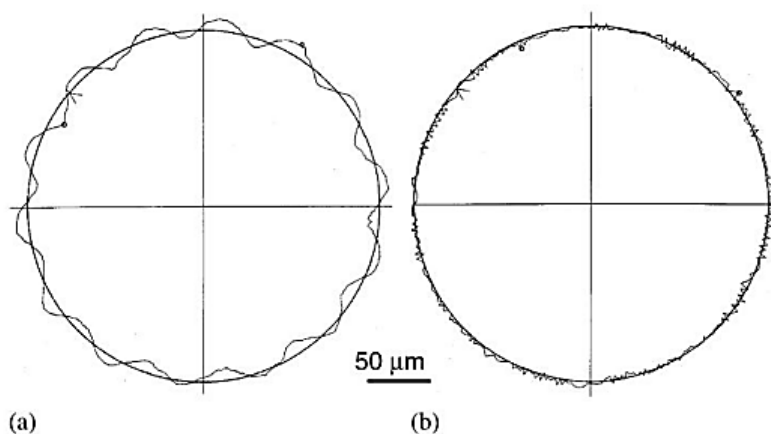
Figura 5. Força de tração e tempo de usinagem em: (a) furação convencional e (b) fresamento por interpolação helicoidal.



Fonte: Adaptado de R. Iyer et al.

Em relação à qualidade do furo, Iyer et al. (2007) demonstraram que furos realizados por interpolação helicoidal apresentam melhor qualidade de trabalho, podendo gerar furos que correspondem a uma tolerância H7, eliminando a necessidade de alargamento para furos de precisão em aços ferramentas. Foi observado também que a estratégia da ferramenta utilizada tem relevância na qualidade do furo, um acabamento superficial da ordem de $0,3 \mu\text{m Ra}$ foi alcançado utilizando ferramenta inteiriça de metal duro. Porém, os autores pontuam que as características geométricas do furo no fresamento por interpolação helicoidal também dependem da capacidade do maquinário empenhado no processo.

Figura 6. Perfis de rugosidade de furos feitos por interpolação helicoidal: (a) inserto intercambiável e (b) ferramenta inteiriça de metal duro.



Fonte: Adaptado de R. Iyer et al.

Considerando fatores de processo como avanço axial, e avanço tangencial por dente e velocidade de corte, além de adotar diferentes relações do balanço da ferramenta como variável de ruído, Pereira, Silva, Lauro, Brandão, Ferreira e Davim (2019), desenvolveram um estudo voltado para o dimensionamento robusto multiobjetivo da qualidade do furo em aço temperado AISI H13. Utilizando modelos de resposta através da metodologia de superfície de resposta, os autores analisaram resultados de rugosidade e circularidade, com a velocidade de corte variando tipicamente entre 40 e 80 m/min, os valores de rugosidade Ra variaram entre 0,19 e 0,44 μm , enquanto a circularidade ficou entre 5,28 e 16,86 μm . O estudo pontua que, embora o balanço da ferramenta tenha sido tratado como variável de ruído, estratégias de usinagem podem ser empregadas para melhorar a robustez do

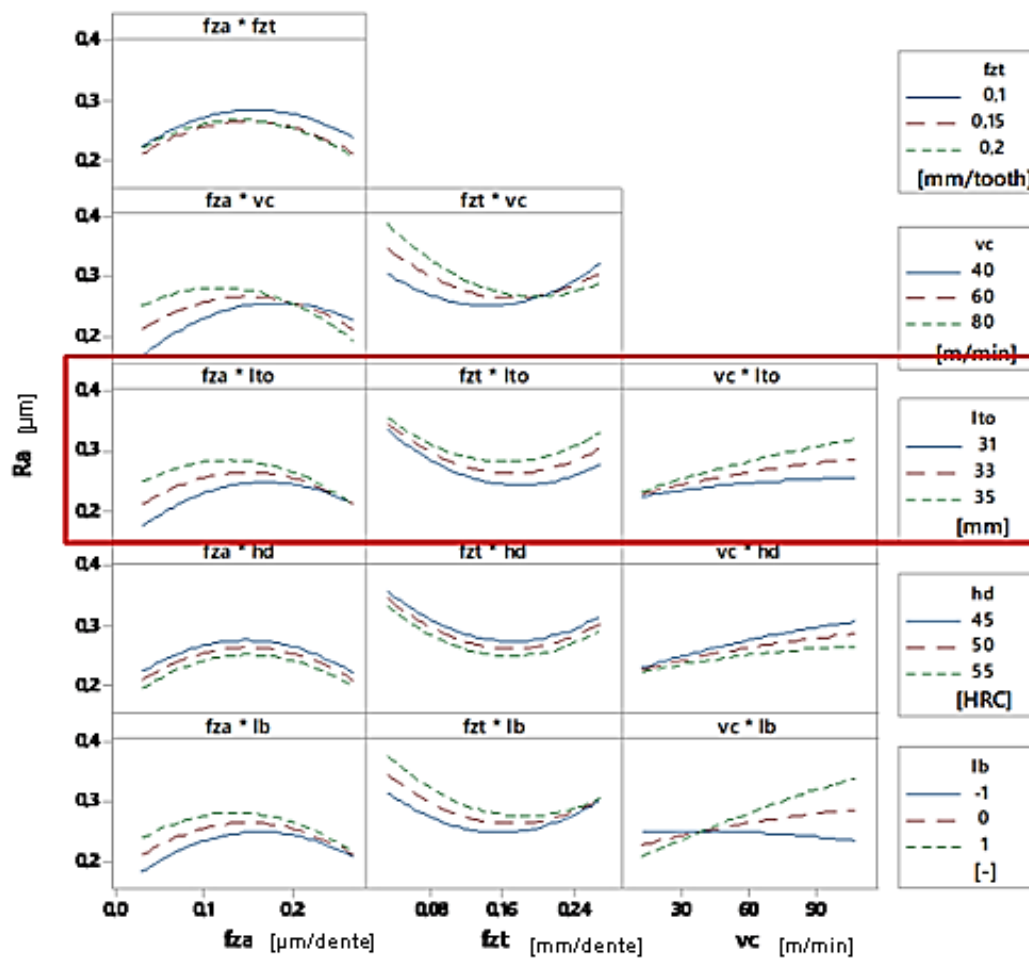
processo. No entanto, é importante garantir uma configuração de balanço adequada para minimizar os erros geométricos e de acabamento. A figura 7 demonstra a influência dos parâmetros de usinagem em relação à rugosidade dos furos, com destaque para o balanço da ferramenta compreendido entre 31 e 35 mm. A tabela 1 apresenta o significado das abreviações apresentadas na figura 7.

Tabela 2: parâmetros de usinagem utilizados em cada ensaio

Abreviação	Significado
fza	Avanço axial por dente a cada hélice [mm/dente]
fzt	Avanço tangencial por dente a cada hélice [mm/dente]
lto	Comprimento em balanço da ferramenta [mm]
Vc	Velocidade de corte [m/min]
hd	Dureza do material [HRC]
lb	Altura do furo / posição da ferramenta em relação ao furo (começo, meio e fim)
Ra	Rugosidade média [μm]

Fonte: Adaptado de Pereira et al.

Figura 7. Destaque para a influência do balanço da ferramenta em relação à rugosidade.

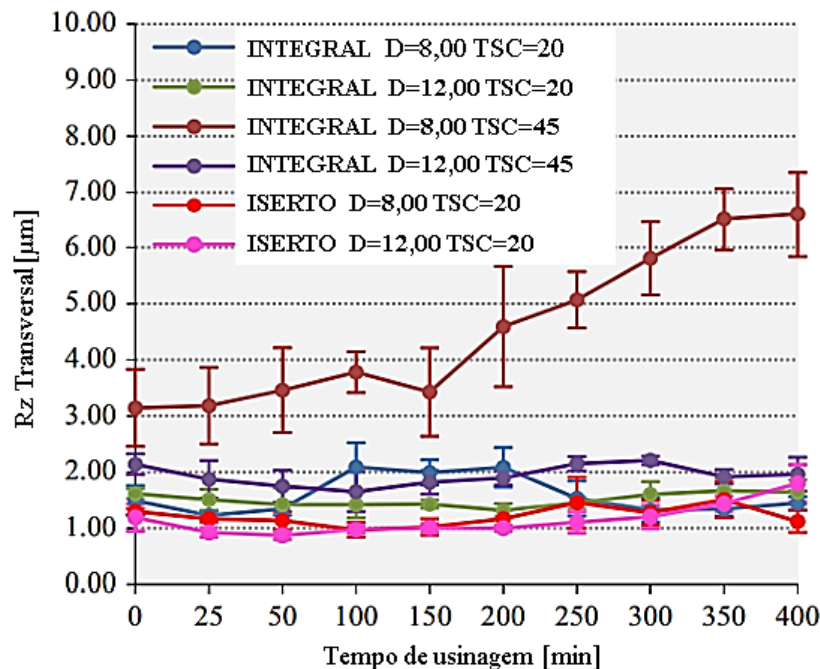


Fonte: Adaptado de Pereira et al.

Aguiar, Diniz e Pereira (2013), realizaram um estudo a fim de verificar a influência da geometria da ferramenta no acabamento e semiacabamento de fresamento de alta velocidade em moldes e matrizes, utilizando ferramentas longas e delgadas. Mantendo a mesma velocidade de corte para usinar aço AISI H13 com dureza de 50 HRC, os autores empregaram diferentes tipos de ferramentas, incluindo fresas de insertos integrais e intercambiáveis com diâmetros de 8 ou 12mm. Além disso, com o intuito de gerar diferentes modos de vibração, foi realizada uma variação do balanço da ferramenta, criando diferentes relações de L/D. O estudo concluiu que é possível alcançar acabamentos de alta qualidade mesmo após o uso prolongado das ferramentas, desde que as condições de fresamento sejam adequadas. Os autores também demonstraram que o desgaste das ferramentas não exerceu influência significativa no acabamento superficial. No entanto, enfatizaram que o principal efeito que afeta negativamente o acabamento é a vibração da ferramenta, destacando a

importância dessa variável no processo. A figura 8 demonstra a evolução da rugosidade da peça com relação ao tempo de usinagem, nela é destacado o tipo de ferramenta, o diâmetro e o coeficiente de esbeltez da ferramenta (TSC) de acordo com a montagem em balanço.

Figura 8. Evolução da rugosidade transversal da peça usinada com relação ao tempo de usinagem e esbeltez da montagem em balanço.



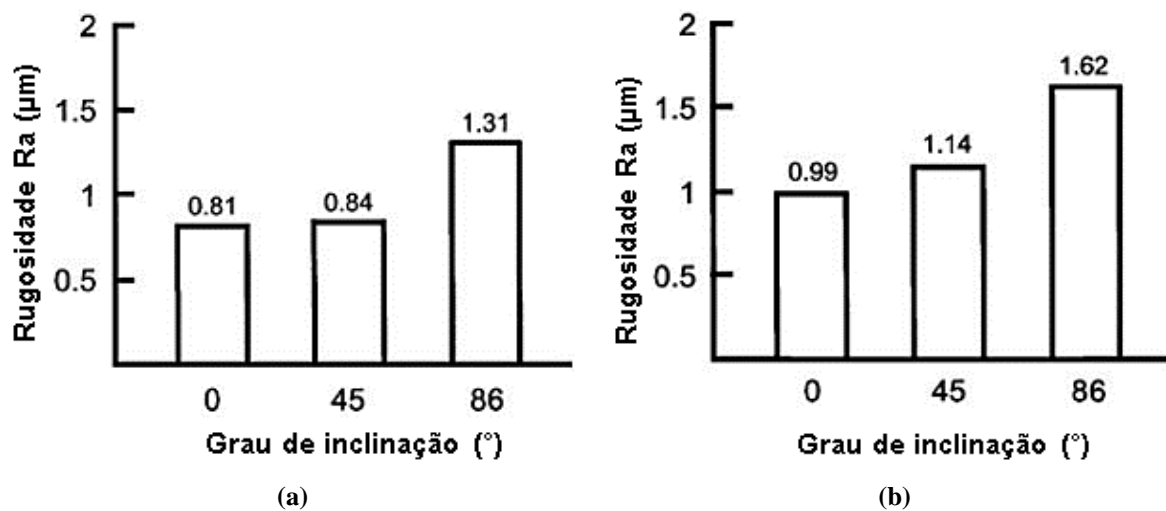
Fonte: Adaptado de Aguiar et al.

Lopez de Lacalle et al. (2002), demonstram em seu trabalho a importância da deflexão da ferramenta, enfatizando que este é um fator crítico que afeta a qualidade da superfície usinada. É principalmente significativo ao utilizar ferramentas com uma grande relação de L/D, pois estas ferramentas tendem a apresentar maiores deflexões durante o processo de usinagem em matrizes de estampagem. Os autores concluem que é essencial considerar a geometria da ferramenta juntamente com as estratégias e parâmetros de usinagem empregados de forma que os efeitos da deflexão sejam mitigados.

Por fim, Kecelj, Kopac, Kampus, Kuzman (2004), realizaram um estudo sobre diferentes relações de L/D, variando entre 5 e 10, e a influência dessa condição na usinagem de moldes de matrizes com dureza entre 50 e 63 HRc. Além dessa condição geométrica de usinagem, foi considerado o grau de inclinação da ferramenta durante o processo. Os autores concluíram que, para ferramentas de cabeça esférica,

o parâmetro L/D é consideravelmente relevante na qualidade superficial da peça usinada e que maiores valores de L/D causam maiores deflexões e conseqüentemente piores qualidades de superfície. Os pesquisadores acrescentam que para graus de inclinação mais próximos de 90° o desgaste da ferramenta influencia diretamente na rugosidade da superfície e na precisão dimensional devido aos maiores graus de deflexão experimentado pela ferramenta. A figura 9 apresenta a relação de grau de inclinação por rugosidade Ra para diferentes configurações de L/D.

Figura 9. Rugosidade Ra da superfície do material de acordo com diferentes relações de L/D e inclinações, (a) configuração L/D = 7, (b) configuração L/D = 10



Fonte: Adaptado de Kecelj et al.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Máquinas Ferramentas (LAMAFAE) no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP), utilizando um centro de usinagem vertical com três eixos ROMI® D 600 (Figura 10) deste laboratório. De acordo com o catálogo Romi (2024), a máquina possui cursos dos eixos x, y e z respectivamente iguais a 600, 610 e 640 milímetros. O manual de programação fornecido pela Romi (2024), aborda que seu sistema de coordenadas seguem a chamada “regra da mão direita”, potência máxima de 15 kW, rotação máxima de 10.000 rpm e velocidade de avanço máxima GO igual a 30 m/min. Além disso, a máquina utilizada conta com sistema de controle numérico FANUC Oi-MD.

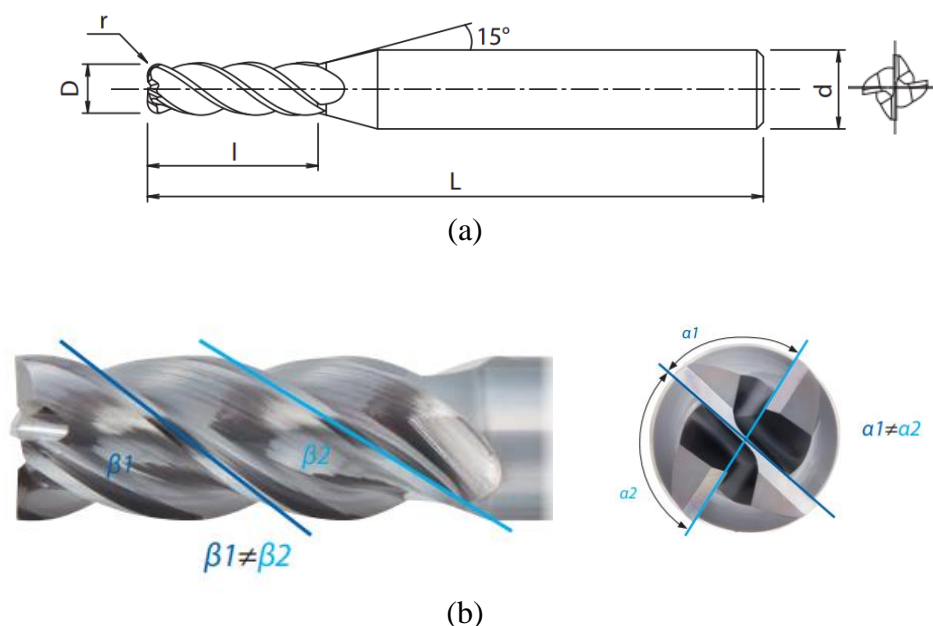
Figura 10. Centro de usinagem vertical ROMI® D 600.



Fonte: própria.

Foram utilizadas cinco fresas OSG AE-VMS 8555830 (Figura 11). Trata-se de uma ferramenta inteira de metal duro da classe P, com quatro arestas de corte, raio de ponta igual a zero, diâmetro da parte cortante D igual a 3 mm, diâmetro da haste de fixação d igual a 6 mm e comprimento total L de 60 mm.

Figura 11. Características da fresa OSG AE-VMS 8555830 (a) dimensões da ferramenta, (b) características geométricas da fresa.



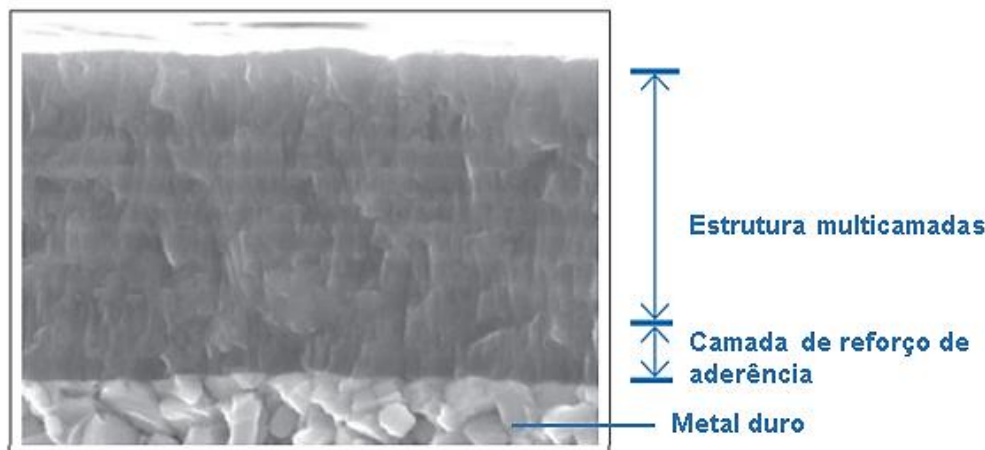
Fonte: Adaptado catálogo OSG AE – VMS Series – volume 11.1 – EU-EM.

Além disso, essa fresa possui ângulos de hélices diferentes variando entre 37° e 40°, espaçamento desigual entre os dentes e ângulo de saída positivo (Figura 11), características que proporcionam estabilidade, reduzindo os efeitos da vibração, facilitam a saída do cavaco e diminuem a força de corte. A ferramenta utilizada possui revestimento multicamadas do tipo Duarise (Figura 12). Segundo informações coletadas no OSC Catalog V6 (2024), em ferramentas de metal duro com revestimento Duarise (chamado no catálogo de SXL) apresentou, sob os mesmos parâmetros de usinagem, desgaste de flanco 20% menor frente a ferramentas com revestimentos convencional e de TiAlN, quando submetidos ao processo de fresamento de Inconel 718 com dureza de 46 HRC.

Migranov et al. (2023), investigaram as propriedades tribológicas de revestimentos nanoestruturados multicamadas na usinagem de ligas de titânio, os autores concluíram que este tipo de revestimentos proporciona uma melhoria da resistência ao desgaste na ordem de duas vezes em relação a ferramentas com diferentes revestimentos. Acrescentam também que, há uma redução significativa na carga térmica e força na zona de corte, em média de 15 a 25%, o que proporciona ao processo um aumento da lubrificação. Além disso, o estudo conclui que há uma redução do coeficiente de atrito em uma ampla faixa de temperatura, de 550 a 950 °C, com redução de até 17% frente aos outros tipos de revestimento.

Essas características contribuem para e reduzir a formação de trincas térmicas, especialmente em processos de usinagem com altas temperaturas (OSG, 2024).

Figura 12. Revestimento Duarise da fresa AE-VMS



Fonte: Adaptado de catálogo OSG AE – VMS Series – volume 11.1–EU-EM.

Primeiramente, foram preparados cinco corpos de prova com dimensões de 100 x 70 x 7 mm a partir de um blank de aço VEX®, fornecido pela Villares Metals, em estado recozido com dureza máxima de 230 HB. O VEX® é um aço ferramenta para trabalho a quente ligado ao Cr-Mo-V-Al e não possui similares normatizados. Esse aço se apresenta como uma alternativa aos aços AISI H11 e H13 e é tipicamente utilizado em ferramentas e matrizes para extrusão a quente de ligas de alumínio, latão e magnésio. Segundo os fornecedores, sua composição química proporciona resistência a tratamentos térmicos, como revenimento, além de boa resposta a nitretação, mantendo um elevado nível de tenacidade e resistência ao desgaste após a formação de nitretos de alumínio em sua camada de difusão (Villares Metals, 2024).

O primeiro corpo de prova foi fixado na morsa do centro de usinagem, enquanto a ferramenta foi fixada no eixo árvore utilizando um mandril do tipo cone porta pinça BT40 norma ER DIN 6499 (Figura 13) juntamente com uma pinça do tipo ISO 40. O programa CNC foi executado para um teste inicial, após ajustes no código G, a trajetória seguida pela fresa foi corrigida, os corpos de prova foram usinados de maneira válida. O procedimento de abertura de furos de 16 mm de diâmetro foi realizado seguindo uma ordem pré-definida para minimizar os efeitos da fadiga térmica entre os furos.

Em sua tese Valle (2001), concluiu que sob várias condições de utilização de lubri-refrigerantes experimentados, em geral, a aplicação de uma emulsão como fluido de corte pode prejudicar a vida útil da ferramenta. O autor destaca ainda que para ferramentas de metal duro sem revestimento tiveram desempenhos piores quando comparados com ferramentas com revestimento. Com a finalidade de excluir esta variável, não foi utilizado fluido de corte neste trabalho.

Figura 13. Esquema de fixação da ferramenta e do corpo de prova.

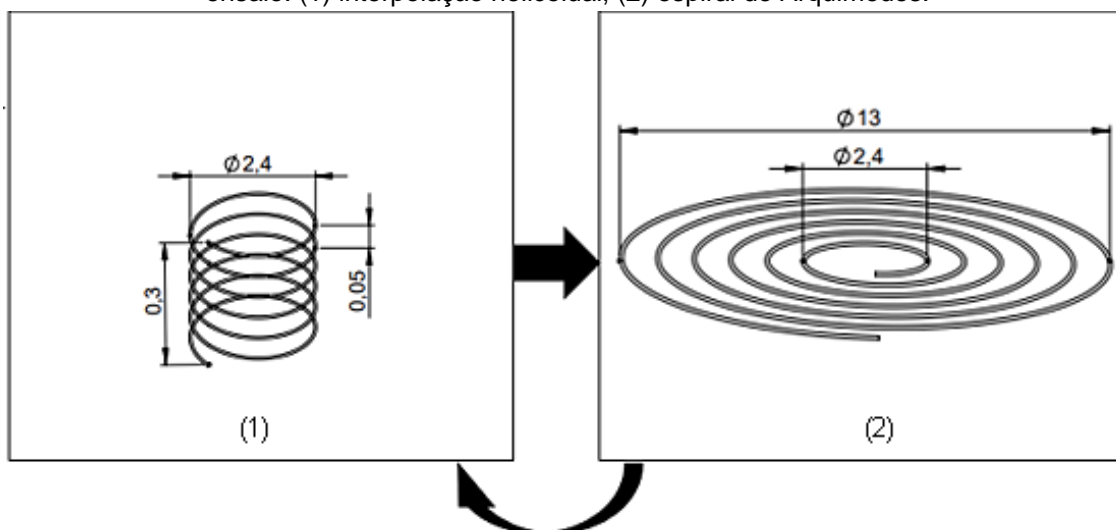


Fonte: própria.

Cada ensaio foi realizado da seguinte forma: a execução foi feita de maneira gradual, com ferramenta atingindo a profundidade de usinagem incremental (a_{pi}) de 0,3 mm ao final de cada etapa. Inicialmente, foi realizada a abertura de um primeiro furo com diâmetro 5,4 mm, utilizando interpolação helicoidal. Para essa etapa, a penetração de trabalho (a_e) foi definida em 1,8 mm, a profundidade de usinagem (a_p) ajustada para 0,05 mm, resultando em 6 interpolações até atingir a profundidade de usinagem incremental (a_{pi}) igual a 0,3 mm. Ao atingir essa profundidade, a ferramenta iniciou uma trajetória seguindo uma espiral de Arquimedes até atingir o diâmetro de 16 mm. Esse procedimento foi repetido até que a espessura total do corpo de prova fosse completamente perfurada. A mesma metodologia foi adotada para a ferramenta em balanço com L/D igual a 5. A figura 14 demonstra a trajetória do centro da

ferramenta durante cada incremento.

Figura 14. Trajetória do centro da ferramenta em cada etapa do processo de abertura de cada ensaio. (1) interpolação helicoidal, (2) espiral de Arquimedes.



Fonte: própria.

A tabela 2 demonstra os parâmetros de usinagem utilizados na abertura de cada ensaio: velocidade de corte (v_c) em m/min, avanço por aresta de corte (f_z) em mm, profundidade de usinagem (a_p) em mm e penetração de trabalho (a_e) em mm. É importante destacar que na fase 2, a máquina CNC ajustou a penetração de trabalho a_e ao longo da abertura do furo até atingir o diâmetro final de 16 mm, e que esse valor foi de aproximadamente 0,9 mm.

Tabela 2: parâmetros de usinagem utilizados em cada ensaio

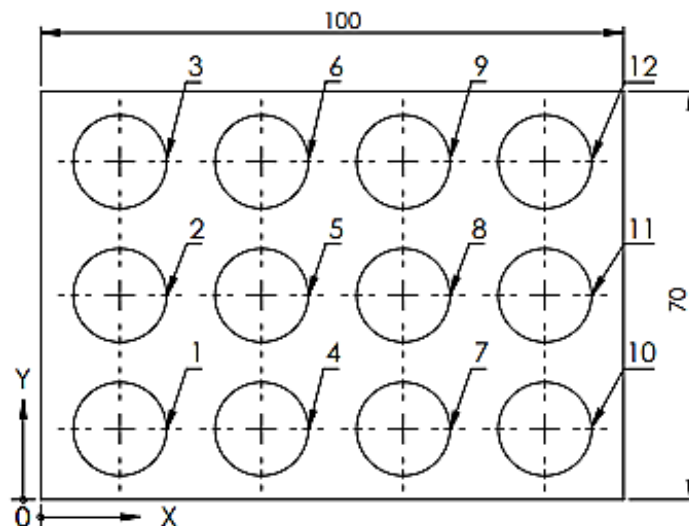
Trajetoária	v_c [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]
1	90	0,01	0,05	1,8
2	90	0,01	0,3	0,9

Fonte: própria.

A ordem definida para a execução dos furos foi: 1, 9, 3, 7, 2, 8, 4, 12, 6, 10, 5 e 11 (Figura 15). No entanto, a norma ABNT NBR ISO 8688 – 2 (2020) recomenda um limite de desgaste geométrico de até 0,3 mm para ferramentas de metal duro em processo de fresamento de topo, este critério é utilizado para acabamentos e especificações mais refinados. Essa recomendação foi adotada como critério de limite de desgaste e após um teste inicial, verificou-se que o número de furos necessários

para atingir o critério foi de 4 furos por ferramenta. Portanto, essa quantidade de furos foi replicada para cada ferramenta e em cada configuração de balanço diferente.

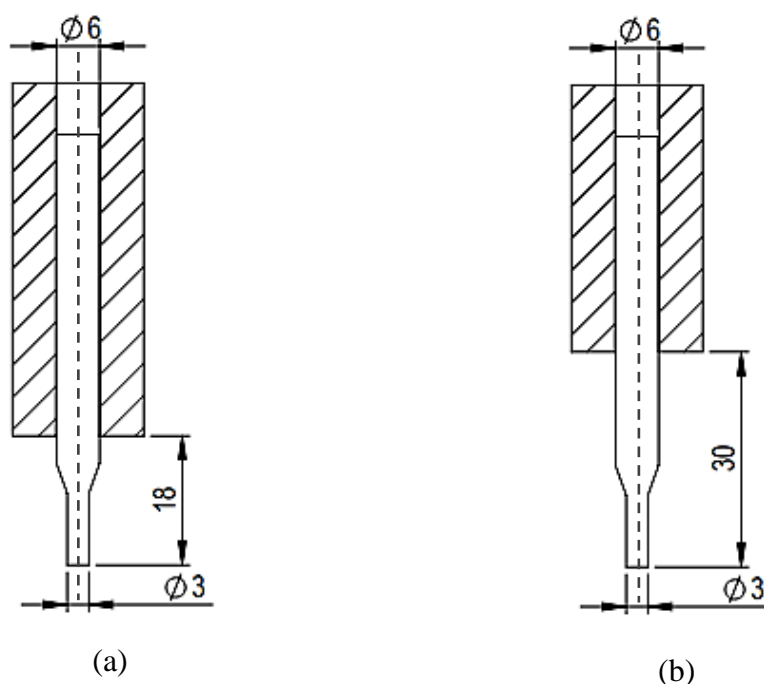
Figura 15. Numeração correspondente a cada ensaio.



Fonte: própria.

Os ensaios foram realizados com a ferramenta em balanços diferentes, dois deles na razão do comprimento livre da ferramenta, L , sobre o diâmetro da haste de fixação, D , iguais a $L/D = 3$ e dois com $L/D = 5$ (Figura 16). Foram fabricados 4 furos por ensaio, totalizando 8 furos para cada relação de L/D . Para cada condição de balanço L/D foi feito o seguinte procedimento: após a abertura de cada furo, os pares de arestas de corte foram monitorados até que o critério de desgaste de flanco adotado fosse atingido.

Figura 16. Representação da fixação da ferramenta em balanço (a) L/D igual a três, (b) L/D igual a cinco.



Fonte: própria.

Para o cálculo do tempo de corte em cada ensaio, foi realizado um estudo sobre a trajetória da ferramenta nas duas etapas que envolvem a abertura do furo de 16 mm, a cada incremento de profundidade (a_{pi}) igual a 0,3 mm. Primeiramente, foi determinado o tempo (t_1) necessário para a abertura do furo central de 5,4 mm. Em seguida, ainda na profundidade de 0,3 mm, calculou-se o tempo (t_2) necessário para a abertura do furo, seguindo uma trajetória em espiral de Arquimedes até atingir o diâmetro de 16 mm. Para completar a análise, os tempos t_1 e t_2 foram somados, resultando no tempo t_3 , que representa o tempo total estimado para abertura completa em cada incremento. Os cálculos que levaram à determinação de t_3 são apresentados abaixo.

Para calcular o tempo necessário para a abertura do furo central com diâmetro de 5,4 mm em cada etapa, com profundidade incremental de 0,3 mm, inicialmente foi determinada a rotação (n) da ferramenta, por meio da equação 1, que se refere à velocidade de corte. Em que v_c representa a velocidade de corte e D representa o diâmetro da parte de cortante da ferramenta.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{90 \cdot 1000}{\pi \cdot 3} = 9549 \text{ [rpm]} \quad (1)$$

Em seguida, da equação 2, foi calculado a velocidade de avanço da ferramenta (v_f). Em que f_z representa a penetração de trabalho para cada aresta de corte e z corresponde ao número de arestas de corte da fresa.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,01 \cdot 4 \cdot 9549 = 382 \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Para o cálculo do tempo (t_h) necessário em cada volta helicoidal do furo central, conforme a equação 4. Foi inicialmente determinado o raio efetivo (r_{e1}) percorrido pela ferramenta, dado pela equação 3. Nesta equação, r_1 representa o raio do furo central.

$$r_{e1} = r_1 - \frac{D}{2} = 2,7 - 1,5 = 1,2 \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$t_h = \frac{\text{Perímetro}}{v_f} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{e1}}{382} = 0,0197 \text{ min} \cong 1,2 \text{ [s]} \quad (4)$$

O número de hélices feitas pela ferramenta por interpolações helicoidais até atingir a profundidade incremental foi determinado pela equação 5.

$$N_{\text{helices}} = \frac{a_{pi}}{a_p} = \frac{0,3}{0,05} = 6 \text{ [-]} \quad (5)$$

Por fim, o tempo (t_1) necessário para a abertura do furo central em cada etapa incremental é dado pela equação 6.

$$t_1 = t_h \cdot N_{\text{helices}} = 1,2 \cdot 6 \cong 7,11 \text{ [s]} \quad (6)$$

A equação 9 demonstra o cálculo para encontrar o tempo (t_2) necessário para a abertura do furo até a dimensão final de 16 mm de diâmetro em cada etapa, mantendo a profundidade incremental de 0,3 mm. Inicialmente, foi determinado o raio efetivo (r_{e2}), dado pela equação 7. Em seguida, a equação 8 apresenta o cálculo utilizado para encontrar o perímetro percorrido pela ferramenta durante a trajetória

em espiral de Arquimedes.

$$r_{e2} = r_{\text{final}} - \frac{D}{2} = 8,0 - 1,5 = 6,5 \text{ [mm]} \quad (7)$$

Perímetro espiral de Arquimedes:

$$P_{\text{arq}} = \int_{r_{\text{ef1}}}^{r_{\text{ef2}}} (2 \cdot \pi \cdot r) dr = 2 \cdot \pi \left(\frac{r^2}{2} \right)_{1,2}^{6,5} = \pi \cdot (6,5^2 - 1,2^2) \cong 128,21 \text{ [mm]} \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{P_{\text{arq}}}{v_f} = \frac{128,21}{382} \cong 0,336 \text{ min} \cong 20,14 \text{ [s]} \quad (9)$$

A equação 10 representa o tempo total estimado para a abertura completa em cada incremento.

$$t_3 = t_1 + t_2 = 7,11 + 20,14 \cong 27,25 \text{ [s]} \quad (10)$$

Por fim, para calcular o tempo necessário para a abertura completa do furo, foi determinado o número de incrementos necessários para perfurar o corpo de prova. A equação 11 apresenta o cálculo utilizado.

$$N_{\text{incrementos}} = \frac{\text{Espessura}}{a_{\text{pi}}} = \frac{7}{0,3} = 23,3333 \text{ [-]} \quad (11)$$

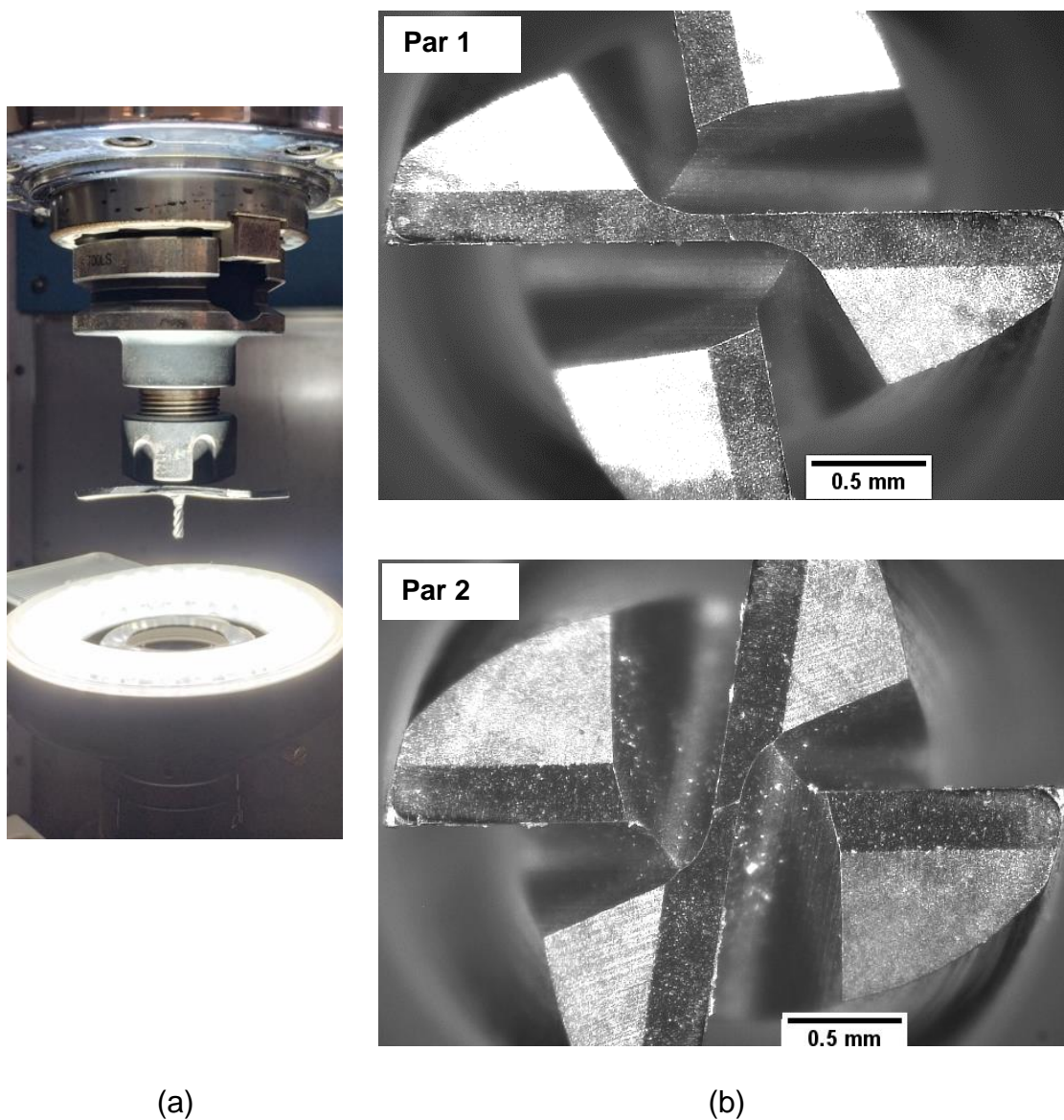
Porém, para assegurar que o corpo de prova foi completamente perfurado, foram considerados 24 incrementos. Portanto, o tempo total estimado para a abertura total de cada ensaio é apresentado pela equação 12.

$$T_{\text{total furo}} = N_{\text{incrementos}} \cdot t_3 = 24 \cdot 27,25 = 653,9 \text{ s} = 10,9 \text{ [min]} \quad (12)$$

Para a captura das imagens das arestas de corte das ferramentas, foi utilizada uma câmera com resolução de 1080p e 2 megapixels, acoplada a um microscópio USB com relação de ampliação de 500x e sensor de imagem de 5 megapixels, juntamente com um anel de iluminação em LED. Após a execução de cada furo, a ferramenta foi posicionada para a logo acima do conjunto câmera, microscópio e LED,

e um registro dos desgastes de flanco (VB) dos pares um e dois das arestas de corte de cada ferramenta foi feito. A figura 17 mostra o esquema de montagem dos equipamentos juntamente com duas capturas de desgastes.

Figura 17. Captura do desgaste de flanco das ferramentas, (a) ferramenta posicionada acima do esquema de montagem câmera, microscópio e LED, (b) captura do desgaste de flanco dos pares de arestas de corte.

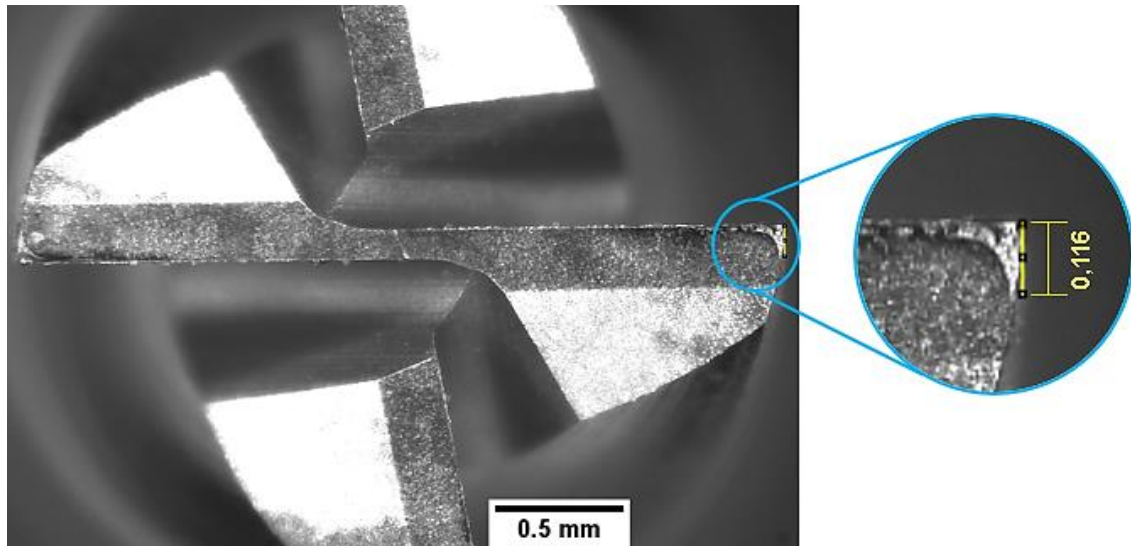


Fonte: própria.

Para medir a evolução do desgaste de flanco após cada furo foi utilizado a software ImageJ. Ao final de cada ensaio, os pares de arestas de corte foram analisados, primeiro foi medido os desgastes do par 1 seguido de uma rotação de 90°

para a medida do desgaste no par 2, com isso, foi coletado o maior valor de desgaste observado em cada par. A figura 18 demonstra o exemplo de medida do desgaste de flanco (VB) de uma das arestas de corte.

Figura 18. Medida do desgaste de flanco de uma aresta de corte.



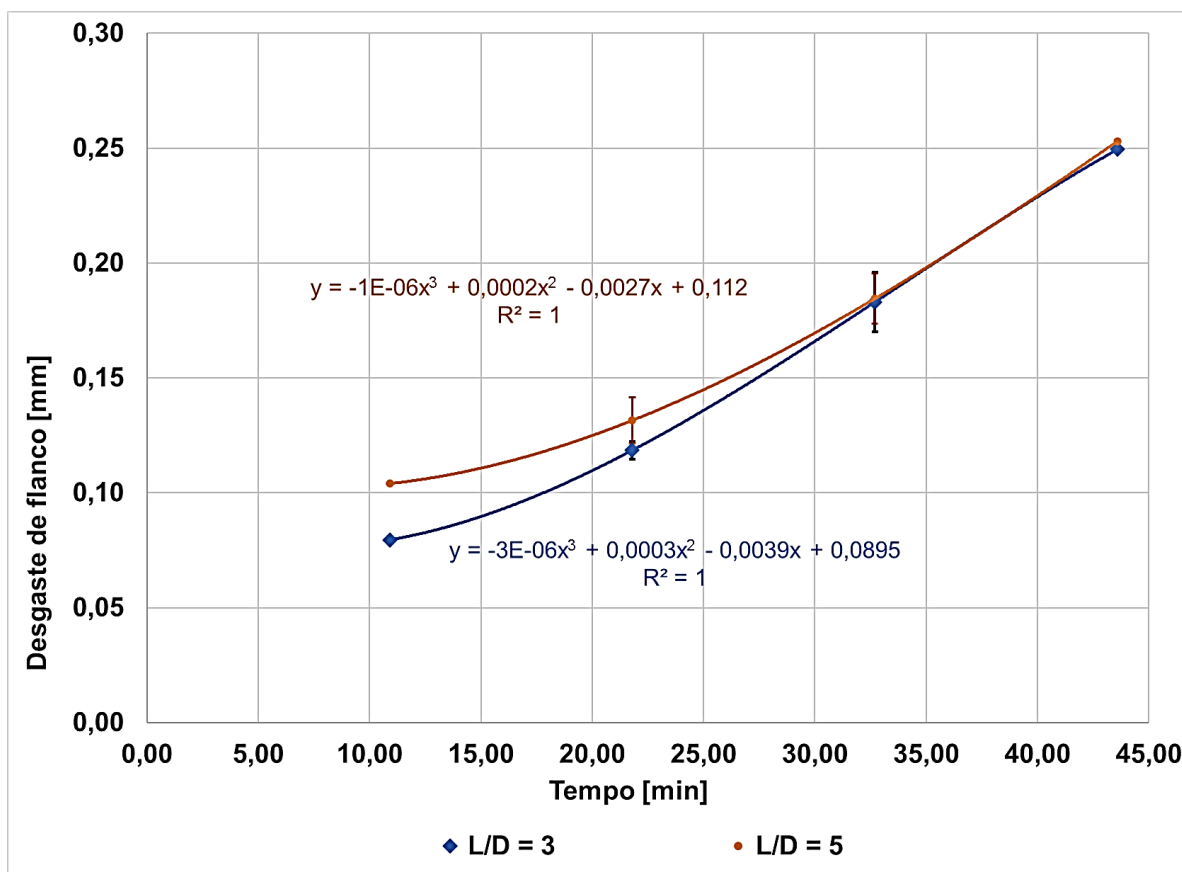
Fonte: própria.

Finalmente, para aferir o diâmetro e o desvio de circularidade foi utilizada a máquina de medição GALILEO Starrett - série AVR 300®. Com capacidade de medição de 300 mm em X e 200 em Z e Y, essa máquina possui tecnologia de medição óptica automática, além de contar com medição por contato, sua exatidão angular e linear é de $\pm 1''$ e $\pm 0,002$ mm, respectivamente. Para cada ensaio, 8 pontos foram aferidos e um relatório com as informações coletadas foi impresso.

4. RESULTADOS

A média dos desgastes de flanco máximos de cada par de arestas após cada furação consta no gráfico de desgaste de flanco por tempo (Figura 19). Com condições de $L/D = 3$ e $L/D = 5$. Após a comparação entre os resultados de desgaste de flanco das ferramentas, como esperado, foi observado que o maior balanço da ferramenta contribuiu para um maior desgaste, porém, esta condição influenciou somente durante a execução dos dois primeiros furos (a partir de aproximadamente 22 min na leitura dos gráficos) e que, a partir destes, o desgaste seguiu uma tendência de convergência entre as duas curvas. As faixas de valores de desgaste estão compreendidas entre 0,079 e 0,249 mm para $L/D = 3$, enquanto 0,104 e 0,253 mm para $L/D = 5$. Os valores médios são de aproximadamente 0,13 para ambos os balanços.

Figura 19. Evolução do desgaste de flanco das ferramentas em balanços diferentes.

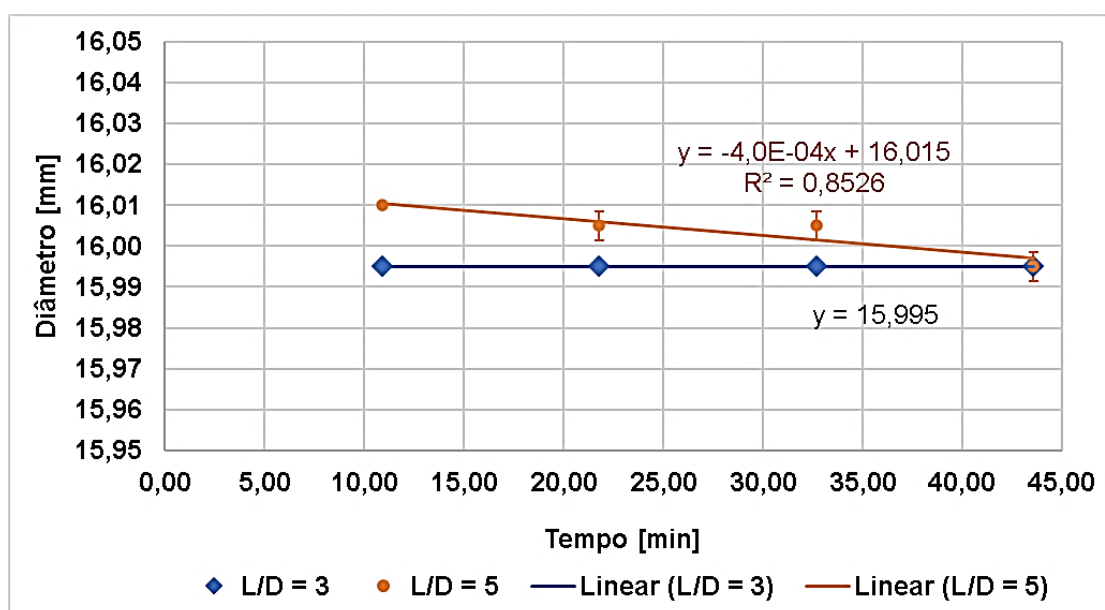


Fonte: própria.

A figura 20 evidencia a variação média dos diâmetros dos furos com relação

ao tempo. A faixa de valores para as ambas as condições de balanço ficaram em 15,995 mm para $L/D = 3$ resultando em um furo com classe de tolerância IT5, enquanto para $L/D = 5$ os valores ficaram entre 15,995 e 16,01 mm, classe IT7, já os valores médios de desvio são 15,995 e 16,004 mm, respectivamente. Assim como o desgaste de flanco, a ferramenta com balanço maior causou uma maior influência na variação do diâmetro nos furos iniciais. Porém, os resultados para o balanço menor não causaram influência no diâmetro dos furos, além disso, assim como nas curvas de desgaste de flanco, há convergência entre as duas curvas.

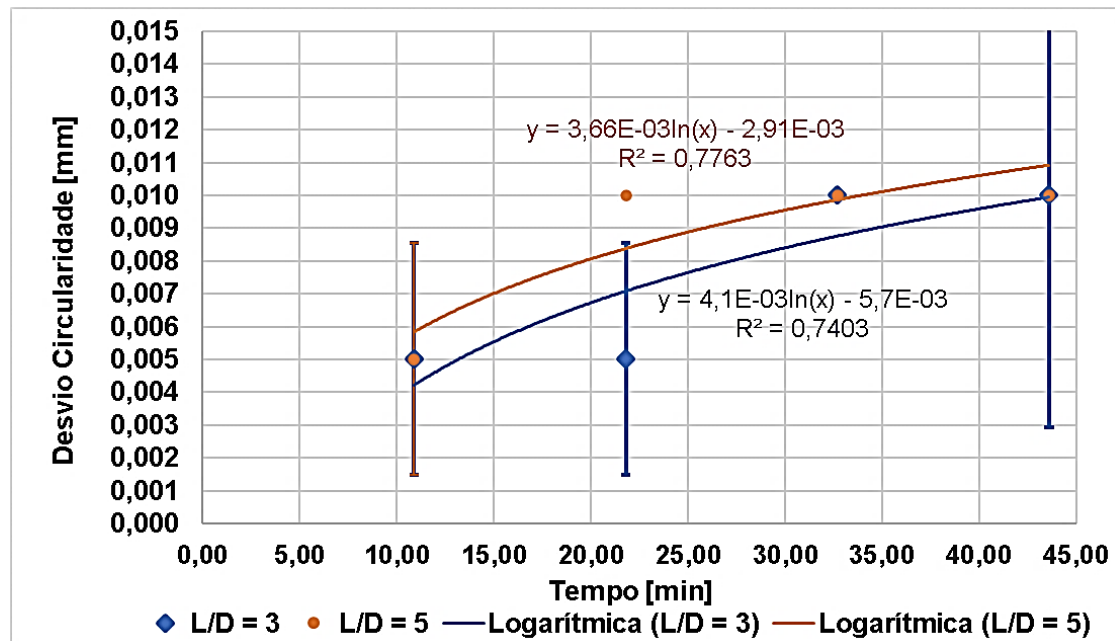
Figura 20. Variação do diâmetro dos furos com ferramentas com balanços diferentes.



Fonte: própria.

A figura 21 apresenta o desvio médio de circularidade dos furos com relação ao tempo de ensaio para cada condição de balanço. Os resultados obtidos evidenciam curvas virtualmente iguais para as duas configurações de balanços diferentes com exceção do segundo ensaio, onde os desvios obtidos diferem em cinco milésimos de milímetros. Assim como nos casos anteriores, as curvas seguem uma tendência de convergência com o passar do tempo de usinagem. Para ambos os balanços, a faixa de valores de ficou compreendida entre 0,01 e 0,005 mm, enquanto os valores médios ficaram com valores iguais a 0,007 e 0,009 mm, respectivamente.

Figura 21. Evolução do desvio de circularidade.



Fonte: própria.

Para todos os gráficos, o desvio padrão considerado é igual a meio desvio para cima e meio desvio para baixo.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que, as diferentes condições geométricas, $L/D = 3$ e $L/D = 5$, impostas ao processo, não impactaram no desgaste de flanco das ferramentas ao longo do tempo, com exceção dos primeiros furos. Sendo assim, as variáveis de saída, desgaste de flanco, variação do diâmetro e desvio de circularidade seguem uma tendência de convergência, além de apresentarem baixas faixas de valores e valores médios iguais ou muito próximos, mostrando que as condições de balanço experimentados não causaram influência relevante na abertura dos quatro furos por ensaio. Essa condição de estabilização e baixa influência pode ser explicada pela característica de antivibração da ferramenta utilizada, conforme especificado no catálogo do fabricante.

A respeito do processo de abertura dos furos, os resultados indicam que a estratégia utilizada pode ser adotada como alternativa para a usinagem de furos com diâmetros maiores do que o da ferramenta, sem a necessidade da troca de ferramenta.

Para os trabalhos posteriores sugere-se variar o L/D em 3, 5 e 7, considerando o sistema de fixação proposto pela norma DIN 6535 HA em conjunto com a variação da velocidade de corte e do avanço por dente, para verificar os efeitos causados na ferramenta e com isso saber se as tendências de estabilização ao longo do tempo se confirmam. Também se propõe a execução dos experimentos com ferramentas diferentes para verificar o comportamento de cada uma das ferramentas diante dos ensaios. Além disso, recomenda-se que um estudo da rugosidade seja feito, para avaliar quais os efeitos causados nessa característica de superfície. Por fim, sugere-se a utilização de fluido de corte durante os ensaios para a investigação dos efeitos causados nas variáveis de resposta.

6. REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões: princípios de engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

AGUIAR, Marcelo Mendes de; DINIZ, Anselmo Eduardo; PEDERIVA, Robson. Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 68, p. 1-10, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.01.002>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6158: Faixas de tolerâncias para medidas geométricas**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 8688-2**. Usinagem — Parâmetros de corte para usinagem de peças de metal — Parte 2: Processo de fresamento. 1. ed. São Paulo, 2020.

COLDWELL, Helen; WOODS, Richard; PAUL, Martin; KOSHY, Philip; DEWES, Richard; ASPINWALL, David. Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 135, n. 2-3, p. 301-311, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00861-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00861-0).

COSTA, D. D.; GOMES, J. O.; PANGRÁCIO, M. L. Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado. **COBEF**, 2015. Disponível em: https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/COF_011058235.pdf.

DENKENA, B.; BOEHNKE, D.; DEGE, J. H. Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 1, n. 2, p. 64-69, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.09.009>.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 ed., São Paulo: Editora Artliber, 2013.

IYER, R.; KOSHY, P.; NG, E. Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 205-210, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.04.006>.

KECELJ, B.; KOPAČ, J.; KAMPUŠ, Z.; KUZMAN, K. Speciality of HSC in manufacturing of forging dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 157–158, p. 536-542, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.112>.

KIM, D.; RAMULU, M. Study on the drilling of titanium/graphite hybrid composites. **ASME Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 129, n. 3, p. 390-396,

2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/249504244_Study_on_the_Drilling_of_TitaniumGraphite_Hybrid_Composites.

LÓPEZ DE LACALLE, Luis N.; LAMIKIZ, A.; SÁNCHEZ, J. A.; ARANA, J. L. Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies. **Journal of Materials**. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00102-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00102-4).

MIGRANOV, M. S.; SHEHTMAN, S. R.; SUKHOVA, N. A.; MITROFANOV, A. P.; GUSEV, A. S.; MIGRANOV, A. M.; REPIN, D. S. Study of Tribotechnical Properties of Multilayer Nanostructured Coatings and Contact Processes during Milling of Titanium Alloys. **Coatings**, v. 13, n. 1, p. 171, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13010171>.

OCS. OCS Catalog v6. Disponível em: https://www.e-ocs.com/pdf/OCS_catalog_v6.pdf. Acesso em: 28 de novembro de 2024

OSG. AE-VMS-SERIES, volume 11.1. 2024. Disponível em: https://eu.osgeurope.com/sites/osg-corporate.dev/files/pdf/product_literature/Leaflet_AE_VMS_VOL.11-1_EU_EN_WEBL.pdf. Acesso em: 16 out. 2024.

Processing Technology, v. 123, n. 2, p. 292-302, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00102-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00102-4).

PEREIRA, Robson Bruno Dutra; SILVA, Laila Alves da; LAURO, Carlos Henrique; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; FERREIRA, João Roberto; DAVIM, J. Paulo. Multi-objective robust design of helical milling hole quality on AISI H13 hardened steel by normalized normal constraint coupled with robust parameter design. **Applied Soft Computing**, v. 75, p. 652-685, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.040>.

PEREIRA, Robson Bruno Dutra; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; PAIVA, Anderson Paulo de; FERREIRA, João Roberto; DAVIM, J. Paulo. A review of helical milling process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 120, p. 27-48, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002>.

ROMI. Centros de usinagem vertical: Linha Romi D. 2024. Disponível em: <https://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/>. Acesso em: 16 out. 2024.

ROMI. Manual de programação e operação: Romi Linha D - CNC Siemens 828D. 2024. Material fornecido pelo professor Armando Ítalo Sette Antonialli para a Universidade Federal de São Carlos.

SADEK, A.; MESHREKI, M.; ATTIA, M. H. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 123-126, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.089>.

TÖNSHOFF, H. K.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; NEISES, A. Machining of holes: developments in drilling technology. **CIRP Annals**, v. 43, n. 2, p. 551-561, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60501-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60501-0). Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0007850607605010>.

VALLE, P. D. Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto. 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VILLARES METALS. Ficha Técnica VEX. 2024. Disponível em: [https://www.villares-metals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-quente/VEX/\(access\)/mobile/](https://www.villares-metals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-quente/VEX/(access)/mobile/). Acesso em: 4 jul. 2024.

WANG, Haiyan; QIN, Xuda; LI, Hao; TAN, Yanqing. A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 5-8, p. 1973-1983, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290477596_A_comparative_study_on_helical_milling_of_CFRPTi_stacks_and_its_individual_layers. Acesso em: 7 nov. 2024.

WANG, Haiyan; QIN, Xuda; LI, Hao. Machinability analysis on helical milling of carbon fiber reinforced polymer. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v. 9, n. 5, p. JAMDSM0057, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283115108_Machinability_analysis_on_helical_milling_of_carbon_fiber_reinforced_polymer. Acesso em: 7 nov. 2024.

WENDA, J. Avaliação de furos obtidos por fresamento helicoidal sob diferentes condições de usinagem. Curitiba, 2009