



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

KACIÊ KAROLINE DE ARAÚJO TRINDADE

**TRAJETÓRIAS ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DO  
FRESAMENTO TROCOIDAL EM AÇO ENDURECIDO**

Recife

2025

KACIÊ KAROLINE DE ARAÚJO TRINDADE

**TRAJETÓRIAS ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO  
TROCICAL EM AÇO ENDURECIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Engenharia de Materiais e Fabricação.

**Orientadores:** Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

Prof. Dr. Flávio José da Silva.

**Coorientador:** Prof. Dr. Maxime Montoya.

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Trindade, Kaciê Karoline de Araújo.

Trajetórias alternativas para a otimização do fresamento trocoidal em aço endurecido / Kaciê Karoline de Araújo Trindade. - Recife, 2025.

121f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

Coorientação: Dr. Flávio José da Silva.

Coorientação: Dr. Maxime Montoya.

Inclui referências.

1. Fresamento trocoidal; 2. Aço AISI 4340; 3. Força de usinagem; 4. Otimização de trajetória; 5. Programação CNC. I. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra. II. Silva, Flávio José da. III. Montoya, Maxime. IV. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**KACIÊ KAROLINE DE ARAÚJO TRINDADE**  
**TRAJETÓRIAS ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO**  
**TROCOIDAL EM AÇO ENDURECIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 06/06/2025

**BANCA EXAMINADORA**  Documento assinado digitalmente  
**KLEBER GONCALVES BEZERRA ALVES**  
Data: 08/07/2025 20:18:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

 Documento assinado digitalmente  
**THERCIO HENRIQUE DE CARVALHO COSTA**  
Data: 30/06/2025 14:10:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Thercio Henrique de Carvalho Costa (Examinador Externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Prof. Dr. Julio Cesar Giubilei Milan (Examinador Externo)

Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima (Examinador Externo)

Universidade Federal da Paraíba  
Documento assinado digitalmente  
 **ROGERIO PONTES DE ARAUJO**  
Data: 30/06/2025 13:44:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Rogério Pontes de Araújo (Examinador Externo)

Universidade de Pernambuco

*Este trabalho é dedicado à minha mãe, Telma  
Cristina, que embora não esteja mais fisicamente  
ao meu lado, está presente em minhas  
lembranças e em coração.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me sustentar nos momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas essenciais no meu caminho.

Ao meu marido, Jânio Almeida, pelo amor, paciência e suporte integral durante toda a jornada do doutorado. Obrigada por acreditar em mim quando até eu quis desistir, por cuidar da nossa família, por me incentivar a seguir e por assumir tantas responsabilidades para que eu pudesse terminar esta etapa. Sem você, este trabalho não teria sido possível.

À minha mãe, Telma Cristina (in memoriam), cuja memória me acompanha como fonte inesgotável de força, amor e inspiração. À minha família, pela paciência, apoio incondicional e por compreenderem minha ausência em tantos momentos importantes para que este trabalho se concretizasse.

Em especial, ao meu irmão João Augusto, que acompanhou de perto minha trajetória acadêmica e me viu lecionar, pesquisar e persistir. Sua presença ao meu lado, mesmo nos momentos mais desafiadores, foi uma inspiração silenciosa e constante. Ver sua conquista ao ingressar em uma universidade federal me enche de orgulho. Que ele trilhe um caminho bonito, com coragem, dedicação e sabedoria.

À minha sogra Eugênia Maria e a toda a família do meu esposo, pela generosidade, cuidado e amor ao acolherem e cuidarem do nosso filho Theodoro, ainda um bebê, enquanto eu escrevia os resultados desta tese. A dedicação de vocês foi fundamental para que eu pudesse concluir esta fase.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves e Prof. Dr. Flávio José da Silva, pela orientação dedicada, pela confiança no meu trabalho e pelo esforço contínuo em viabilizar os caminhos necessários à realização desta pesquisa. A capacidade do Prof. Kleber de propor soluções e estabelecer conexões foi fundamental para a execução dos experimentos e para a publicação dos resultados apresentados.

Aos meu coorientador, Prof. Dr. Maxime Montoya, pelo apoio constante, pelas discussões técnicas valiosas e pelas contribuições científicas que enriqueceram imensamente este trabalho.

Ao Prof. Dr. Alessandro Roger, meus mais sinceros agradecimentos e um parabéns especial por sua postura acolhedora, por ter abraçado com entusiasmo a ideia deste trabalho e por disponibilizar o laboratório para a realização dos experimentos de usinagem. Sua contribuição científica foi decisiva para o sucesso deste estudo.

Ao Prof. Dr. Adilson José de Oliveira, por sua colaboração técnica e por sempre estar disposto a ajudar. Aos técnicos de laboratório Tiago Monteiro e Rubens, pelo auxílio criterioso e profissional durante a execução dos experimentos, garantindo a qualidade e a segurança de cada etapa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro essencial à realização desta pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta tese, deixo meu sincero agradecimento.

Haw ficou mais ansioso e teve dúvidas a respeito de se realmente queira entrar no labirinto. Ele escreveu uma frase na parede à sua frente e ficou olhando-a durante alguns minutos: *O que você faria se não tivesse medo?* (...) Sempre que começava a ficar desencorajado, lembrava-se de que o que estava fazendo, independente do quanto fosse desagradável no momento, na verdade era muito melhor do que ficar sem Queijo. Estava assumindo o controle, em vez de simplesmente deixar que as coisas lhe acontecessem.

(JOHNSON, 2000)

## RESUMO

Este estudo investigou estratégias de fresamento trocoidal aplicadas à usinagem do aço AISI 4340 temperado e revenido ( $40 \pm 2$  HRC), um material amplamente utilizado em componentes estruturais dos setores aeroespacial e automotivo. O objetivo principal foi desenvolver e comparar três trajetórias trocoidais — convencional (C), semielíptica horizontal (SH) e semielíptica vertical (SV) — quanto ao desempenho mecânico e energético, analisando as componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), o tempo de processamento e o trabalho mecânico, sob condições a seco e com fluido refrigerante. A metodologia incluiu ensaios de usinagem com monitoramento dinâmico de forças (20 kHz) usando ferramentas de metal duro (7 arestas, TiAlN). A trajetória SV, com fluido refrigerante, apresentou menor trabalho mecânico (2,03 J/ciclo) e maior estabilidade, sendo recomendada para cavidades profundas. Sua otimização para 250 m/min aumentou o trabalho em 21,7%, mas reduziu o tempo de usinagem em 35,7%. A trajetória SH destacou-se pela maior produtividade (tempo de 2 min e 13 s contra 2 min e 44 s da trajetória convencional) e menor variabilidade de forças (desvio padrão < 3,5 N). Conclui-se que a trajetória SH é mais indicada para operações com foco em produtividade, enquanto a SV se sobressai em eficiência energética. Os resultados fornecem subsídios quantitativos para a seleção de estratégias de usinagem aplicáveis à indústria de materiais endurecidos.

**Palavras-chave:** fresamento trocoidal; aço AISI 4340; força de usinagem; otimização de trajetória; programação CNC.

## ABSTRACT

This study investigated trochoidal milling strategies for machining quenched and tempered AISI 4340 steel ( $40 \pm 2$  HRC), a material widely used in structural components for aerospace and automotive industries. The main objective was to develop and evaluate the performance of three trochoidal paths - conventional (C), horizontal semi-elliptical (SH), and vertical semi-elliptical (SV) - analyzing machining force components ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), processing time, and mechanical work under dry and coolant conditions. The methodology included CNC testing with dynamic force monitoring (20 kHz) using carbide tools (7 flutes, TiAlN coating). The SV trajectory with coolant demonstrated the lowest mechanical work (2.03 J/cycle), making it ideal for deep cavities. Optimization to 250 m/min increased the work to 2.47 J (+21.7%) but reduced machining time by 35.7%. The SH strategy showed higher productivity (2 min e 13 s) with lower force variability ( $SD F_x/F_y < 3.5$  N) under coolant conditions. Optimization at 250 m/min for SV redistributed loads ( $F_z$  +132.5%,  $F_x$  -13.6%) and reduced peak resultant force by 5.7%. It is concluded that SH is optimal for productivity, while SV offers better energy efficiency, with coolant being crucial for force control. The results provide quantitative parameters for industrial application in hard material machining.

**Keywords:** trochoidal milling; AISI 4340 steel; cutting forces; toolpath optimization; CNC programming.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fresamento Trocoidal .....	12
Figura 2 – Parâmetros da trajetória trocoidal .....	18
Figura 3 – Trajetória descrita por uma aresta da ferramenta de corte, quando $R_{cp} = 10\text{ mm}$ , $R_t = 3\text{ mm}$ , $\theta = 20\text{ rpm}$ , $\phi = 0,30\text{rads}$ , $v_{feed} = 0,025$ .....	19
Figura 4 – (a) Trajetória descrita por uma aresta da ferramenta de corte e (b) geometria do cavaco formado com o incremento do passo radial da trajetória da ferramenta ..	20
Figura 5 – Trajetória trocoidal tradicional e trajetória <i>double trochoidal milling</i> .....	21
Figura 6 – Comparação entre a trajetória trocoidal tradicional e a trajetória proposta por Pleta e Mears (2016).....	21
Figura 7 – Geração do caminho da ferramenta que descreve as (a) trajetórias circular e (b) elipsoidal.....	22
Figura 8 – Comparação da espessura do cavaco com a força de usinagem para (a) trajetória circular e a (b) trajetória elipsoidal.....	23
Figura 9 – Análise da profundidade radial de corte ( $ae$ ) para as trajetória trocoidal tradicional e elipsoidal .....	24
Figura 10 – Variação da trajetória trocoidal tradicional .....	25
Figura 11 – Ângulo de contato ferramenta-peça no fresamento trocoidal.....	27
Figura 12 – Comparação da força de usinagem, tempo de vida da ferramenta e quantidade de peças usinadas entre quatro diferentes tipos de trajetórias de usinagem .....	28
Figura 13 – Comparação entre a espessura do cavaco produzido no fresamento trocoidal e no fresamento de canais com trajetória de contorno .....	29
Figura 14 – Análise da temperatura de corte no fresamento trocoidal. (a) comparação entre a temperatura de corte com o ângulo de contato ferramenta-peça; (b) choque térmico e (c) temperatura de corte para fresamento trocoidal e fresamento com trajetória de contorno .....	30
Figura 15 – Parâmetros de corte recomendados para o fresamento trocoidal.....	35
Figura 16 – Largura mínima de canal indicado para diferentes diâmetros de fresas	36
Figura 17 – Zonas de geração de calor durante a usinagem .....	39
Figura 18 – Formato do programa CNC.....	46

Figura 19 – Orientação dos eixos nas fresadora e/ou centros de usinagem verticais e horizontais, tornos horizontais e centro de usinagem 5 eixos com eixo-árvore articulado.....	47
Figura 20 – Exemplo de linhas de um programa CNC .....	48
Figura 21 – Compensação do comprimento da ferramenta .....	48
Figura 22 – Direção horária e anti-horária para o plano XY (G17), ZX (G18) e YZ (G19) .....	50
Figura 23 - Distância entre o ponto inicial e o centro do arco pela coordenadas I, J e K no plano XY (G17), ZX (G18) e YZ (G19).....	51
Figura 24 – Interpolação circular absoluta e incremental .....	51
Figura 25 – Exemplo de interpolação spline .....	52
Figura 26 - Caminho trocoidal baseado em eq. paramétricas programado no software CAM .....	53
Figura 27 - Caminho trocoidal baseado em eq. paramétricas programado no software Excel .....	54
Figura 28 – Programação automática no painel do controlador CNC .....	55
Figura 29 – Caminho trocoidal escrito de forma manual (à esquerda), chamado pelo autor de “trocoidal circular” e de forma matemática (à direita), chamado pelo autor de “trocoidal não circular”.....	55
Figura 30 – Representação do movimento da ferramenta durante o fresamento trocoidal.....	56
Figura 31 – Fluxograma de Execução.....	57
Figura 32 – Microestrutura do aço AISI 4340 endurecido .....	60
Figura 33 – Geometria do corpo de prova.....	61
Figura 34 – Desenho 2D da ferramenta utilizada nos experimentos.....	62
Figura 35 – Fixação da ferramenta de corte .....	63
Figura 36 - Processo de fresamento com indicação das direções das componentes de força medidas pelo dinamômetro .....	68
Figura 37 – Trajetórias trocoidais e seus códigos .....	71
Figura 38 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal convencional.....	74
Figura 39 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal semielíptica vertical .....	75
Figura 40 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal semielíptica horizontal .....	76
Figura 41 – Relação entre a força de corte e o avanço.....	81

Figura 42 – Pressão específica de corte do aço AISI 4340 em função do avanço....	82
Figura 43 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória convencional (C): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte.....	85
Figura 44 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória semielíptica horizontal (SH): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte.....	86
Figura 45 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória semielíptica vertical (SV): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte.....	89
Figura 46 – Picos de $F_z$ no sinal de força da trajetória trocoidal convencional a seco.....	90
Figura 47 – Comparação da média das forças pico ( $n=1000$ ) com desvios padrão para diferentes estratégias e condições de refrigeração.....	91
Figura 48 – Média das componentes das forças de usinagem ( $F_x$ , $F_y$ e $ F_z $ ) com desvios padrão nas estratégias de fresamento trocoidal.....	93
Figura 49 – Média da força resultante de usinagem ( $F_u$ ) com desvios padrão nas estratégias de fresamento trocoidal.....	94
Figura 50 – Perfil da força de usinagem.....	96
Figura 51 – Trabalho mecânico por trajetória e condição de refrigeração.....	101
Figura 52 – Evolução da força resultante ao longo do tempo para a trajetória SV com parâmetros de corte otimizados ( $V_c = 250$ m/min).....	108
Figura 53 – Distribuição das componentes $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ ao longo dos ciclos trocoidais para a trajetória SV com parâmetros de corte otimizados ( $v_c = 250$ m/min).....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compilado de informações sobre material usinado, fluido refrigerante e ferramenta utilizados nos principais trabalhos publicados sobre fresamento trocoidal .....	31
Tabela 2 – Classificação do metal duro de acordo com a aplicação .....	38
Tabela 3 – Composição química do aço AISI 4340.....	59
Tabela 4 – Velocidade de corte para a ferramenta EC-H7 10-20C10CFR.5M72.....	63
Tabela 5 – Parâmetros de corte adotados para os ensaios de usinagem.....	64
Tabela 6 – Estratégias de trajetória trocoidal e respectivas condições de refrigeração adotadas nos ensaios .....	67
Tabela 7 – Dados da calibração do dinamômetro e erros percentuais nas medições .....	68
Tabela 8 – Comparativo geral das trajetórias trocoidais .....	78
Tabela 9 – Pressão específica de corte do aço AISI 4340 com $40\pm 2$ HRC .....	81
Tabela 10 – Estatísticas das forças de usinagem para diferentes trajetórias e condições de refrigeração .....	91
Tabela 11 - Comparação do tempo de usinagem entre trajetórias trocoidais .....	98
Tabela 12 – Comparativo entre condição padrão e condição otimizada da trajetória SV com fluido de corte .....	107

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1	ESTRATÉGIAS TROCIDAIS APLICADAS AO FRESAMENTO .....	17
3.2	FERRAMENTAS DE CORTE PARA O FRESAMENTO TROCIDAIS .....	31
3.3	MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES PARA A USINAGEM.....	39
3.3.1	<b>Tipo de meios lubri-refrigerantes</b> .....	41
3.3.2	<b>Seleção do meio lubri-refrigerante: impacto no corte</b> .....	43
3.4	PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS CNC .....	44
3.4.1	<b>Estrutura de um programa CNC</b> .....	45
3.4.2	<b>Programação em sistemas absolutos e incrementais</b> .....	49
3.4.3	<b>Funções de interpolação</b> .....	49
3.4.4	<b>Programação de trajetórias trocoidais</b> .....	52
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>57</b>
4.1	FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO .....	57
4.2	DEFINIÇÕES GERAIS .....	58
4.2.1	<b>Máquinas-ferramentas</b> .....	58
4.2.2	<b>Material e geometria dos corpos de prova</b> .....	58
4.2.3	<b>Material e geometria da ferramenta de corte</b> .....	61
4.2.4	<b>Parâmetros de Usinagem</b> .....	64
4.3	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL .....	66
4.3.1	<b>Aquisição e Calibração da Força de Usinagem</b> .....	67
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>71</b>
5.1	GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS TROCIDAIS .....	71
5.1.1	<b>Análise do código NC</b> .....	73
5.1.2	<b>Cálculo do Comprimento das Trajetórias Trocoidais</b> .....	78
5.2	ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM.....	80
5.2.1	<b>Cálculo da pressão específica de corte do material ensaiado</b> .....	80
5.2.2	<b>Influência do tipo de refrigeração sobre as componentes da força de usinagem (Fx, Fy e Fz)</b> .....	84
5.2.3	<b>Análise gráfica da força de usinagem</b> .....	95
5.3	ANÁLISE DO TEMPO DE USINAGEM .....	97

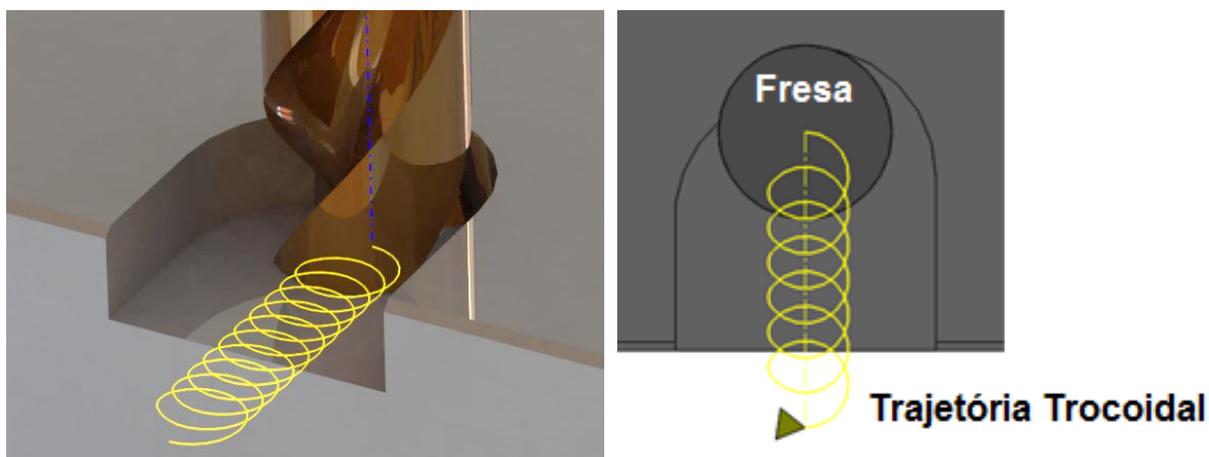
5.4	ANÁLISE DO TRABALHO MECÂNICO NO FRESAMENTO TROCOIDAL.....	99
5.5	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	102
5.5.1	<b>Eficiência geométrica das trajetórias.....</b>	<b>102</b>
5.5.2	<b>Influência da refrigeração nas forças e estabilidade.....</b>	<b>103</b>
5.5.3	<b>Avaliação energética com base no trabalho mecânico.....</b>	<b>104</b>
5.5.4	<b>Estabilidade dinâmica do processo.....</b>	<b>105</b>
5.5.5	<b>Implicações para seleção de estratégias.....</b>	<b>105</b>
5.5.6	<b>Avaliação da estratégia semielíptica vertical sob parâmetros de corte otimizados.....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>110</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	111
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem de materiais endurecidos, como o aço AISI 4340 temperado e revenido com dureza de 40 HRC, tem ganhado destaque na indústria devido à crescente demanda por peças com elevada dureza e alta qualidade superficial, dimensional e geométrica, especialmente nos setores aeroespacial, naval, petroquímico, e de moldes e matrizes. Tradicionalmente, o processo de fabricação dessas peças envolve o desbaste do material ainda em estado “mole”, seguido de tratamento térmico e uma etapa de acabamento (por exemplo, retificação). No entanto, esse processo demanda tempo significativo e geralmente requer múltiplas montagens na máquina, o que compromete a precisão do processo (Waszczuk *et al.*, 2017; Ulutan; Özel, 2020). Como alternativa, técnicas de *hard machining* vêm sendo empregadas para possibilitar a usinagem completa da peça em uma única fixação, aumentando a eficiência e a precisão.

Nesse contexto, o fresamento trocoidal tem emergido como uma estratégia promissora na usinagem de aços endurecidos, como o AISI 4340, principalmente em razão de seu desempenho superior em termos de distribuição da força de usinagem, estabilidade do processo e redução do desgaste da ferramenta (dos Santos *et al.*, 2024; Shixiong *et al.*, 2016; Polishetty *et al.*, 2016). O fresamento trocoidal caracteriza-se pelo movimento circular ou espiral da ferramenta, combinado com seu avanço progressivo ao longo da peça, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Fresamento Trocoidal



Fonte: Autoria própria (2025)

Esse padrão de trajetória limita o ângulo de contato entre a ferramenta e a peça — com valores em torno de  $83,82^\circ$  — e permite a aplicação de profundidades axiais de corte elevadas, otimizando o uso da aresta de corte e promovendo a dissipação uniforme de calor e desgaste (Deng *et al.*, 2020). Essa estratégia também se mostra eficaz na usinagem de cavidades profundas e canais, comuns em geometrias complexas. O fresamento trocoidal favorece transições suaves no percurso da ferramenta, reduzindo vibrações e melhorando a integridade superficial da peça (Shahl *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2020). Além disso, a menor força de usinagem e o reduzido estresse térmico e mecânico sobre a ferramenta aumentam sua vida útil e a eficiência do processo (Pleta *et al.*, 2019; Ducroux *et al.*, 2019; Kozový *et al.* 2023).

Apesar das vantagens, o fresamento trocoidal apresenta limitações, como a elevada complexidade do código de trajetória, que exige maior esforço mecânico dos servo-motores e resulta em menores velocidades de avanço (Trindade, 2018). Em usinagens profundas, há também dificuldades na remoção de cavacos e na refrigeração da ferramenta devido à sua imersão no material (Waszczuk *et al.*, 2017). Além disso, o percurso fora do corte aumenta o tempo total de usinagem. Em estudo com aço P20 (36 HRC), Shixiong *et al.* (2016) observaram maior tempo de usinagem com a trajetória trocoidal em relação à linear, embora com menor desgaste da ferramenta e força de usinagem mais estável.

Outro fator importante é o uso de fluido de corte com ferramentas de metal duro. Embora o fresamento a seco seja recomendado em desbaste para evitar choques térmicos (Deng *et al.*, 2020), em canais profundos e estreitos o uso de fluido pode ser essencial para remoção de cavacos e prevenção de entupimentos. Segundo Volosova *et al.* (2020), ferramentas de metal duro são compatíveis com lubrificantes bem formulados, mas sua sensibilidade térmica pode limitar a refrigeração em certas condições. Assim, a estratégia de refrigeração deve ser cuidadosamente selecionada para otimizar os resultados do fresamento trocoidal.

Embora o fresamento trocoidal seja amplamente reconhecido por seus benefícios na usinagem de materiais endurecidos, observa-se uma escassez de estudos comparativos que avaliem o impacto de diferentes geometrias de trajetória sob condições variadas de refrigeração, especialmente em canais profundos de aço AISI 4340 temperado. A literatura existente tende a focar em trajetórias circulares

tradicionais ou em condições ideais de corte, negligenciando os desafios operacionais impostos por cavidades estreitas e pela necessidade de controle térmico eficaz.

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe uma abordagem experimental voltada à avaliação de trajetórias trocoidais não convencionais, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre estratégias aplicáveis em contextos industriais mais críticos. Nesse sentido, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: *como diferentes geometrias de trajetória trocoidal influenciam o desempenho do fresamento de canais profundos em aço AISI 4340 temperado, considerando as condições de refrigeração e os parâmetros de corte?* Para responde-la, parte-se da hipótese de que trajetórias elípticas, adequadamente projetadas, podem proporcionar maior eficiência energética e estabilidade de forças, sem comprometer a produtividade.

Para investigar essa hipótese, o estudo desenvolve e analisa experimentalmente duas trajetórias alternativas — semielíptica horizontal e vertical — com foco na otimização do desempenho energético e na estabilidade do processo. O diferencial do estudo está no desenvolvimento manual de códigos CNC para trajetórias trocoidais não circulares e na realização de experimentos controlados que avaliam sua eficiência na usinagem de canais profundos, um cenário ainda pouco explorado pela literatura técnica.

A metodologia adotada neste estudo envolveu o desenvolvimento manual dos códigos NC com diferentes padrões de trajetória, realização de ensaios em centro de usinagem CNC com monitoramento dinâmico das componentes da força de usinagem (20 kHz), medição do tempo de usinagem e cálculo do trabalho mecânico. Foram utilizadas fresas de metal duro com sete arestas e revestimento TiAlN, aplicadas ao aço AISI 4340 com  $40 \pm 2$  HRC, sob condições controladas de corte e refrigeração.

Como resultado, esta pesquisa contribui com evidências inéditas sobre o efeito da geometria da trajetória em aplicações industriais, oferecendo parâmetros quantitativos para suportar a tomada de decisão na usinagem de materiais de difícil usinabilidade. O impacto esperado é fornecer subsídios técnicos que auxiliem a indústria na escolha fundamentada de estratégias de usinagem, considerando critérios energéticos e mecânicos.

Esta tese está estruturada da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos. O Capítulo 3 aborda a revisão bibliográfica, com ênfase em estratégias de trajetória, ferramentas, lubri-refrigeração e programação CNC. No Capítulo 4, são detalhados os procedimentos metodológicos, incluindo planejamento experimental e parâmetros de corte. O Capítulo 5 discute os resultados obtidos, comparando as trajetórias quanto ao desempenho mecânico e energético. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para estudos futuros.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e comparar três trajetórias trocoidais (convencional, semielíptica horizontal e semielíptica vertical) no fresamento de canais profundos no aço AISI 4340 temperado e revenido ( $40 \pm 2$  HRC), avaliando seu desempenho em termos de força de usinagem, trabalho mecânico e tempo de usinagem, sob condições de corte a seco e com fluido de corte abundante, visando identificar a estratégia mais eficiente para aplicações industriais.

Nesse sentido, foram adotados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o fresamento trocoidal, abordando as principais estratégias de trajetória, tipos de ferramentas, condições de lubri-refrigeração e programação CNC, a fim de embasar teoricamente a condução da pesquisa experimental.
- b) Avaliar a influência das trajetórias trocoidais (convencional, semielíptica horizontal e semielíptica vertical) na força de usinagem (componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e no trabalho mecânico por ciclo, considerando diferentes condições de refrigeração;
- c) Comparar o tempo de usinagem e a eficiência energética entre as três trajetórias, identificando a estratégia mais produtiva e energeticamente eficiente;
- d) Analisar a estabilidade dinâmica do processo de usinagem para cada trajetória, com base na variabilidade e distribuição das forças;
- e) Estabelecer recomendações práticas para a seleção da estratégia de usinagem mais adequada conforme o objetivo do processo, considerando produtividade e eficiência energética.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica são abordadas: as estratégias trocoidais aplicadas ao fresamento; as ferramentas de corte aplicadas ao fresamento trocoidal; os meios lubri-refrigerantes para a usinagem; e a geração do código G na programação CNC.

#### 3.1 ESTRATÉGIAS TROCOIDAIS APLICADAS AO FRESAMENTO

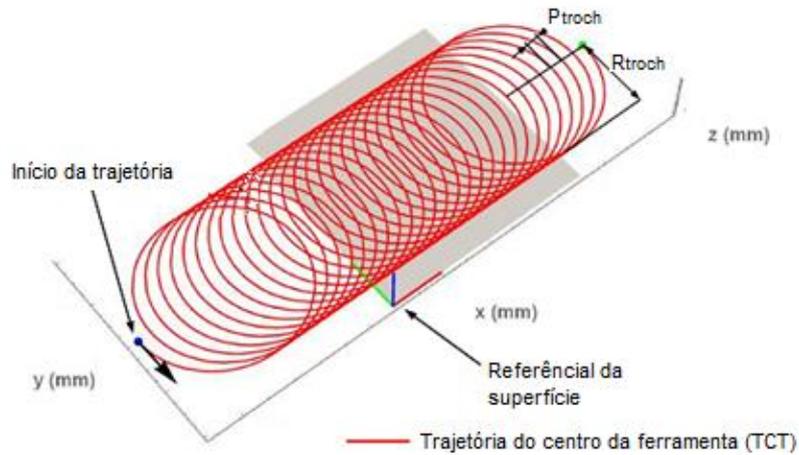
No fresamento trocoidal, a ferramenta de corte percorre um caminho que combina movimentos circulares e de translação, simultaneamente. Esse caminho é descrito como trajetória trocoidal. Ele é um método geralmente aplicado para a usinagem de canais, cavidades e bolsões com largura maior do que o diâmetro da fresa. Uma de suas principais vantagens está relacionada ao uso de pequena profundidade radial de usinagem ( $a_e$ ) e elevada profundidade axial de usinagem ( $a_p$ ), o que favorece o fresamento de materiais com baixo índice de usinabilidade e elevada dureza, tais como: aços temperados e revenidos, ferro fundido branco e ligas à base de titânio e de níquel (Otkur; Lazoglu, 2007; Polishetty *et al.*, 2014).

Ducroux *et al.* (2019) descreve a equação paramétrica que prevê o caminho representado pelo centro da ferramenta de corte no fresamento trocoidal, conforme mostrado na equação 1.

$$\begin{cases} X_{troch}(t) = \frac{P_{troch}}{2\pi} \cdot \omega_{troch} \cdot t + R_{troch} \cdot \cos(m \cdot \omega_{troch} \cdot t) \\ Y_{troch}(t) = R_{troch} \cdot \sin(m \cdot \omega_{troch} \cdot t) \end{cases} \quad (1)$$

Onde “ $R_{troch}$ ” representa o raio do trocoide em milímetros, “ $\omega_{troch}$ ” simboliza a velocidade angular em rad/s, “ $m$ ” é uma constante que indica se o corte será concordante ( $m = 1$ ) ou discordante ( $m = -1$ ), e “ $P_{troch}$ ” descreve o passo radial da trajetória em milímetros, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Parâmetros da trajetória trocoidal



Fonte: adaptado de Ducroux *et al.* (2019)

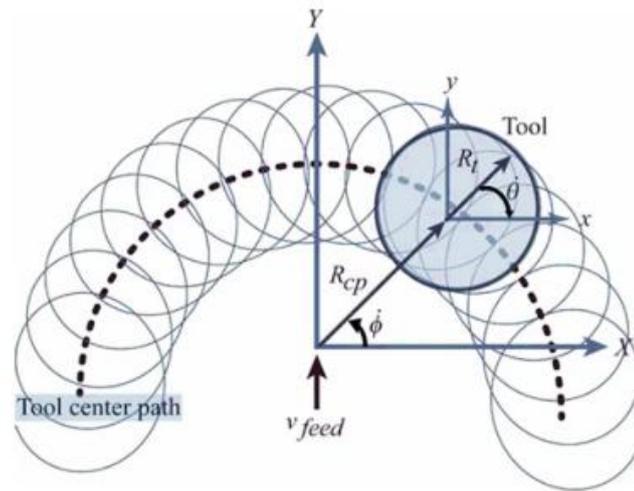
A velocidade angular ( $\omega_{troch}$ ) no fresamento trocoidal é descrita por Ducroux *et al.* (2019) através da equação 2. Onde “ $L_{troch}$ ” representa o comprimento da curva trocoidal em uma volta e “ $V_f$ ” indica a velocidade de avanço. É válido destacar que essa equação provém de uma aproximação e que se torna imprecisa, caso “ $P_{troch}$ ” se torne maior que “ $R_{troch}$ ”, o que é incomum.

$$\omega_{troch} = \frac{2\pi \cdot V_f}{60 \cdot L_{troch}} \quad (2)$$

Quando uma fresa, que se encontra em rotação, tem deslocamento sobre a peça usinada, a ponta de cada aresta de corte da ferramenta percorre uma trajetória trocoidal em função da própria rotação da ferramenta, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Trajetória descrita por uma aresta da ferramenta de corte, quando  $R_{cp} = 10 \text{ mm}$ ,

$$R_t = 3 \text{ mm}, \dot{\theta} = 20 \text{ rpm}, \dot{\phi} = 0,30 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, v_{feed} = 0,025.$$



Fonte: Pleta *et al.* (2019)

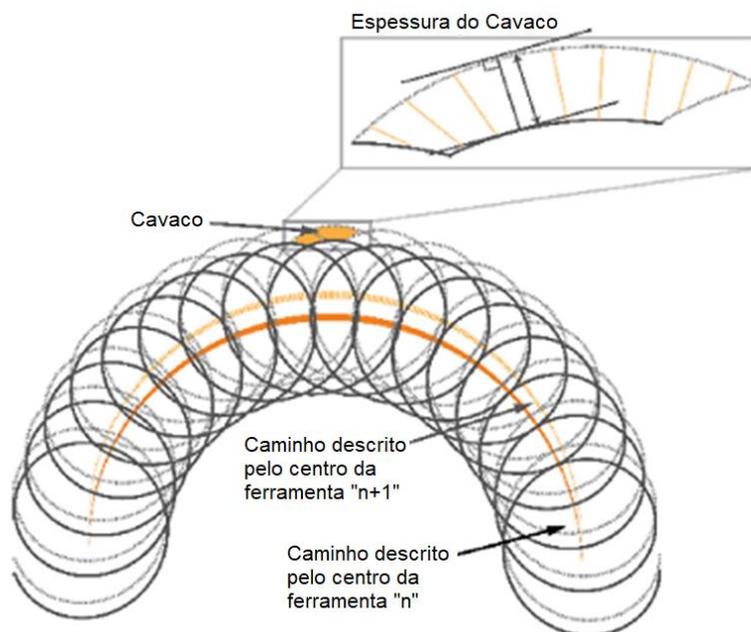
Através da equação 3 é possível obter a curva que representa a trajetória descrita por uma aresta de corte quando a ferramenta percorre um semicírculo (Pleta *et al.*, 2019).

$$\begin{cases} X_t = R_{cp} \cdot \cos(\dot{\phi}t) + R_t \cdot \cos(\dot{\theta}t) \\ Y_t = R_{cp} \cdot \sin(\dot{\phi}t) + R_t \cdot \sin(\dot{\theta}t) + v_{feed} \cdot t \end{cases} \quad \text{para } t \in [t_i, t_f] \quad (3)$$

Onde “ $R_{cp}$ ” é o raio do caminho descrito pelo centro da ferramenta exibido como a linha tracejada na Figura 3; “ $R_t$ ” é o raio da ferramenta; “ $\dot{\phi}$ ” descreve a posição da ferramenta no espaço, ou ainda, a velocidade de translação da ferramenta [rad/s]; “ $\dot{\theta}$ ” descreve a posição da aresta de corte no espaço (durante a usinagem, seria a velocidade de rotação do fuso [rpm]) e “ $v_{feed}$ ” representa o avanço linear [mm].

Com o caminho da ferramenta definido, a geometria e espessura do cavaco foram determinadas através da área delimitada entre os caminhos trocoidais sucessivos, conforme ilustrado na Figura 4. Uma descrição detalhada de como determinar essa espessura do cavaco foi estudada por Niaki, Pleta e Mears (2018) e será mostrada ainda nesta seção.

Figura 4 – (a) Trajetória descrita por uma aresta da ferramenta de corte e (b) geometria do cavaco formado com o incremento do passo radial da trajetória da ferramenta



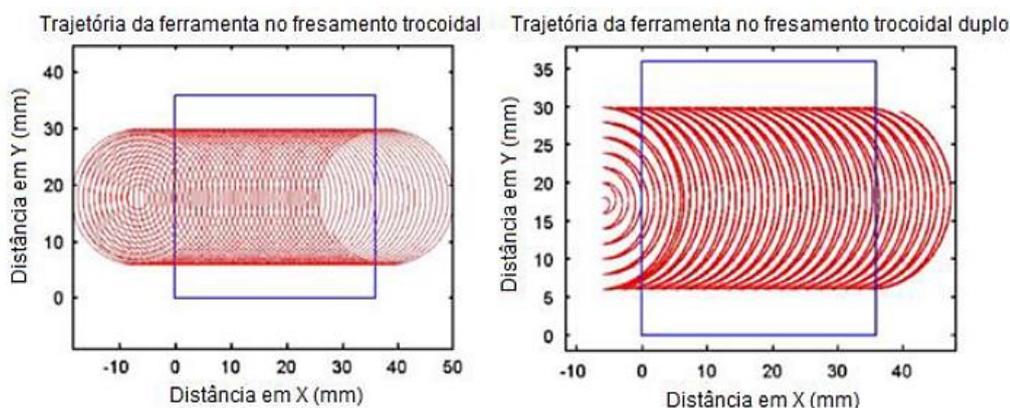
Fonte: Pleta *et al.* (2019)

As trajetórias trocoidais podem sofrer alterações em seu caminho para obter melhorias relacionadas ao tempo de usinagem e melhorar o acabamento superficial da peça usinada. Otkur e Lazoglu (2007), Pleta e Mears (2016), Shixiong *et al.* (2016), Trindade (2018), Huang *et al.* (2020) e Uhlmann *et al.* (2020) são exemplos de autores que desenvolveram e analisaram tipos diferentes de caminhos trocoidais. Shixiong *et al.* (2016) estudaram trajetórias trocoidais com diâmetro de trocoide variável e observaram que a vida útil da ferramenta teve um aumento de 12% quando comparada a trajetória trocoidal tradicional, com diâmetro constante. Mais detalhes do trabalho de Shixiong *et al.* (2016) são mostrados adiante.

Otkur e Lazoglu (2007) desenvolveram uma trajetória chamada por eles de *double trochoidal milling* que combina movimento curvilíneo horário e anti-horário para descrever a trajetória da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 5. Tal estratégia foi desenvolvida com o intuito de eliminar o caminho no qual a ferramenta percorre sem realizar qualquer corte e, com isso, reduzir pela metade o tempo de usinagem. Os resultados mostraram redução de 50,4% no tempo de usinagem e aumento de 10% na força de usinagem quando a *double trochoidal milling* foi comparada com a trajetória trocoidal tradicional. Contudo, a aplicação da nova trajetória pode ocasionar

problemas associados à vibração, à qualidade superficial da peça usinada e à vida de ferramenta em função da mudança constante de corte concordante e discordante durante a usinagem.

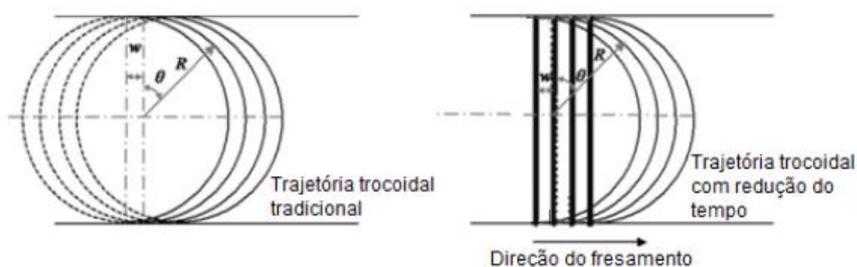
Figura 5 – Trajetória trocoidal tradicional e trajetória *double trochoidal milling*



Fonte: adaptado de Otkur e Lazoglu (2007)

Pleta e Mears (2016) elaboraram uma modificação na trajetória trocoidal tradicional também com o objetivo de reduzir o tempo de usinagem. Para isso, eles eliminaram o caminho semicircular que a ferramenta executaria sem realizar o corte e o substituíram por um caminho em linha reta, conforme mostrado na Figura 6. Os resultados da usinagem utilizando essa trajetória mostraram desgaste de entalhe na aresta de corte. O surgimento desse tipo de desgaste supõe-se estar relacionado com a mudança brusca de direção na trajetória, na transição de circular para linear.

Figura 6 – Comparação entre a trajetória trocoidal tradicional e a trajetória proposta por Pleta e Mears (2016)

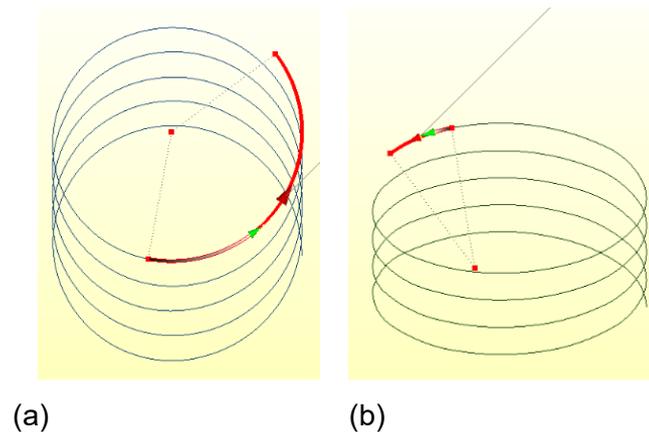


Fonte: adaptado de Pleta e Mears (2016)

Uma desvantagem associada à trajetória trocoidal tradicional (circular) é o fato da profundidade radial de usinagem ( $a_e$ ) ter uma grande variação ao longo do caminho descrito pela ferramenta. Isso ocorre devido às características geométricas dos círculos inscritos e resulta na baixa taxa de remoção de material. Diante disso,

Trindade (2018) propôs uma variação da trajetória trocoidal tradicional (circular) e a chamou de trajetória elipsoidal. Essa nova trajetória foi criada a partir da adição de uma variável “k” na equação paramétrica da trajetória circular, conforme mostrado na equação 4 e na Figura 7.

Figura 7 – Geração do caminho da ferramenta que descreve as (a) trajetórias circular e (b) elipsoidal



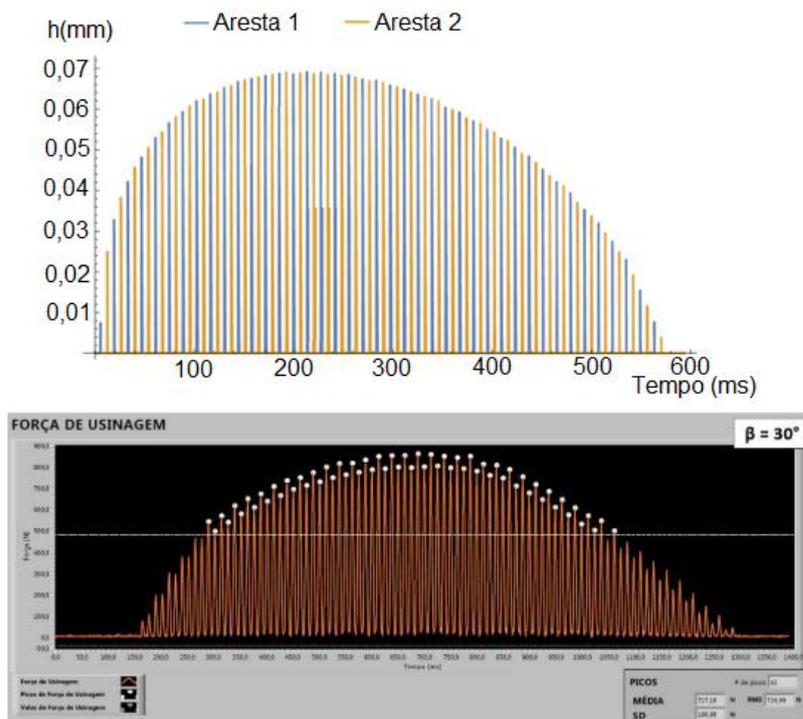
Fonte: Trindade (2018)

$$\begin{cases} x(t) = R_{troch} \cdot \cos(2\pi t) \\ y(t) = P_{troch} \cdot t + k \cdot R_{troch} \cdot \sin(2\pi t) \end{cases} ; \quad 0 \leq t \leq n \quad (4)$$

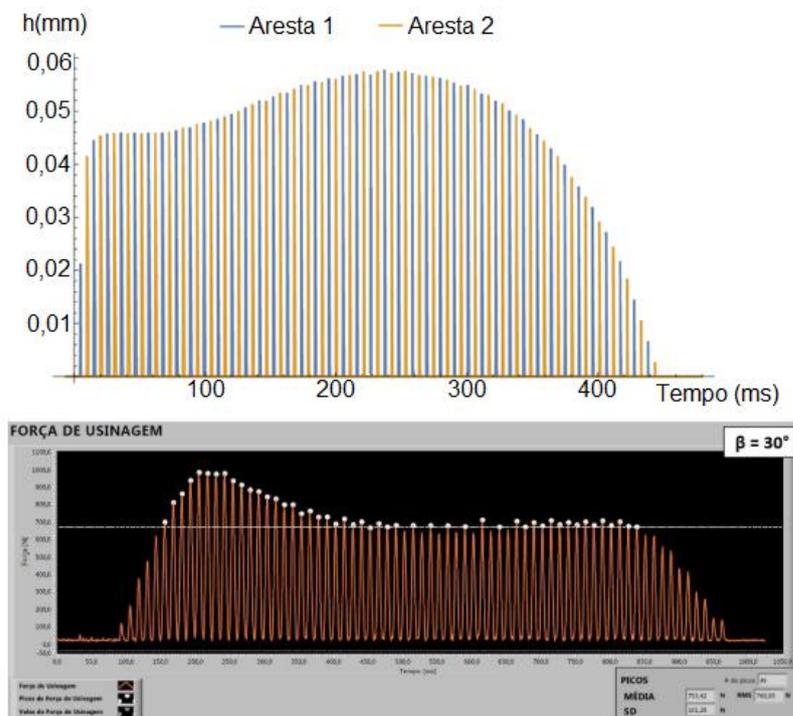
Onde “ $R_{troch}$ ” representa o raio do trocoide em milímetros e “ $P_{troch}$ ” descreve o passo radial da trajetória em milímetros (representados na Figura 2), “ $k$ ” é a constante que define o tipo de trajetória (se  $k = 1$  tem-se a trajetória circular, se  $0 < k < 1$  tem-se diferentes trajetórias elipsoidais) e “ $n$ ” indica o número de revoluções da trajetória. Trindade (2018) adotou  $k = 0,5$  para a trajetória elipsoidal estudada e avaliou o seu comportamento quanto ao comprimento da trajetória, o tempo de usinagem e a força de usinagem, quando comparada à trajetória circular. Essas avaliações foram realizadas por meio de ensaios experimentais durante a abertura de um canal em linha reta no aço AISI 4340 com  $40 \pm 2$  HRC. Os resultados mostraram que a trajetória elipsoidal possui comprimento de curva menor (22,8%) em relação à trajetória circular, tornando o tempo direto de usinagem proporcionalmente menor (22,8%). Além disso, verificou-se que o comportamento da força de usinagem é similar à espessura do cavaco, conforme mostrado na Figura 8. Portanto, na estratégia trocoidal elipsoidal, a força de usinagem apresenta menores variações em comparação com a força na

estratégia circular, assim como o “ $a_e$ ” e, conseqüentemente, a variação do ângulo de contato ferramenta-peça.

Figura 8 – Comparação da espessura do cavaco com a força de usinagem para (a) trajetória circular e a (b) trajetória elipsoidal



(a) Trajetória Trocoidal Tradicional (circular)

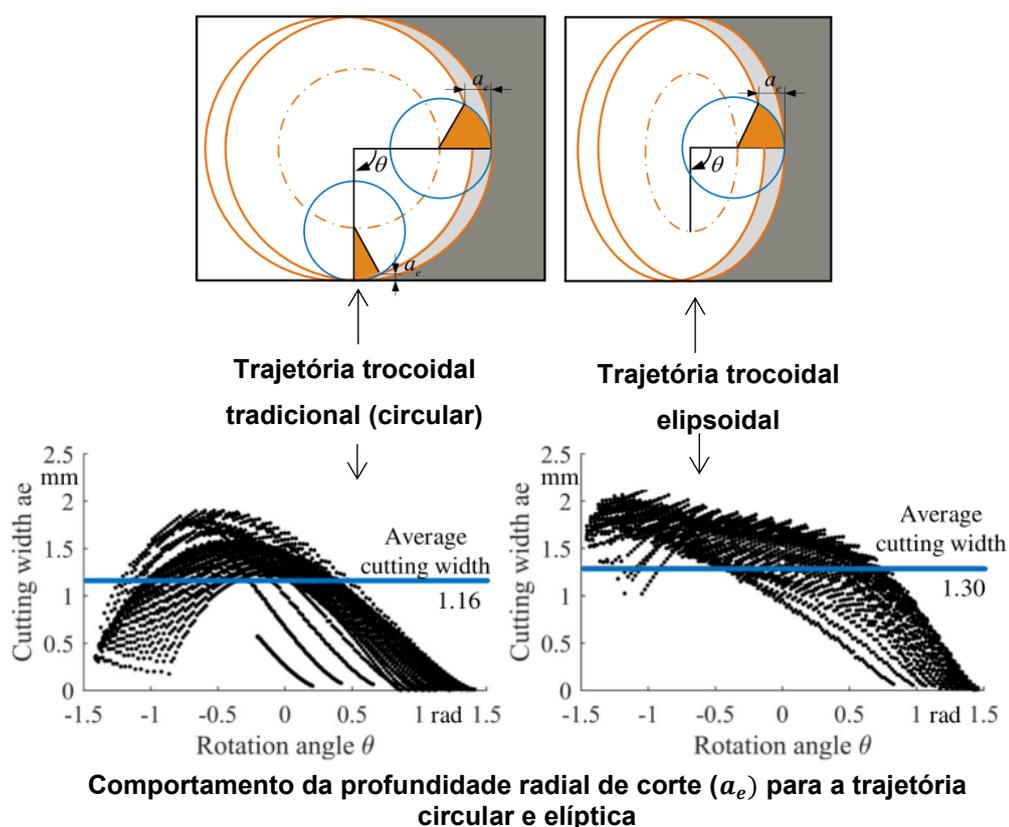


(b) Trajetória Trocoidal Elipsoidal

Fonte: adaptado de Trindade (2018)

Huang *et al.* (2020) comparou a trajetória trocoidal elipsoidal com a trajetória tradicional (circular) na usinagem de uma cavidade fechada em aço inoxidável ASTM A565. Os resultados experimentais mostraram uma redução de 12,7% no tempo de usinagem e um pequeno aumento da força de usinagem (3,9%), em comparação com o caminho da ferramenta trocoidal circular. A Figura 9 mostra a análise da profundidade radial de corte ( $a_e$ ) para as trajetórias trocoidal tradicional e elipsoidal. Os resultados experimentais mostraram que o “ $a_e$ ” da trajetória tradicional aumenta lentamente até o valor máximo dado e então continua a diminuir. Para a trajetória elíptica, o “ $a_e$ ” atinge o máximo rapidamente e diminui lentamente para 0; assim, uma profundidade radial de usinagem média mais alta é alcançada (12,1%), em comparação com o caminho da ferramenta tradicional circular. Percebe-se ainda muita semelhança do comportamento da profundidade radial de corte ( $a_e$ ) de ambas as trajetórias com o perfil da força resultante de usinagem mostrado na Figura 8.

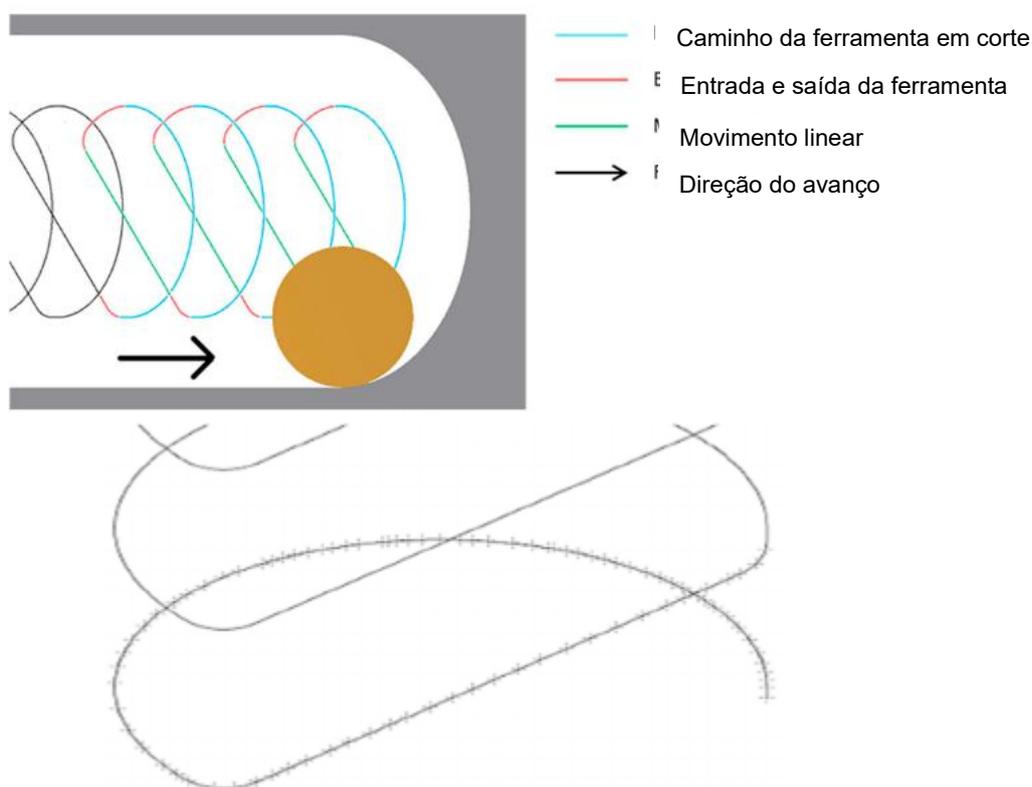
Figura 9 – Análise da profundidade radial de corte ( $a_e$ ) para as trajetória trocoidal tradicional e elipsoidal



Fonte: adaptado de Huang *et al.* (2020)

Uhlmann *et al.* (2020) analisaram outra variação da trajetória trocoidal, mostrada na Figura 10, para usinagem de um canal no aço AISI P20 + S utilizando o robô industrial (caracterizado por possuir menor rigidez que as máquinas-ferramentas convencionais). A trajetória estudada foi gerada dinamicamente por *software* CAD/CAM, através da seleção do volume de corte e de outros parâmetros relacionados à usinagem (material usinado, material da ferramenta, potência e velocidade máxima do eixo-árvore, avanço máximo e passo radial da trajetória).

Figura 10 – Variação da trajetória trocoidal tradicional



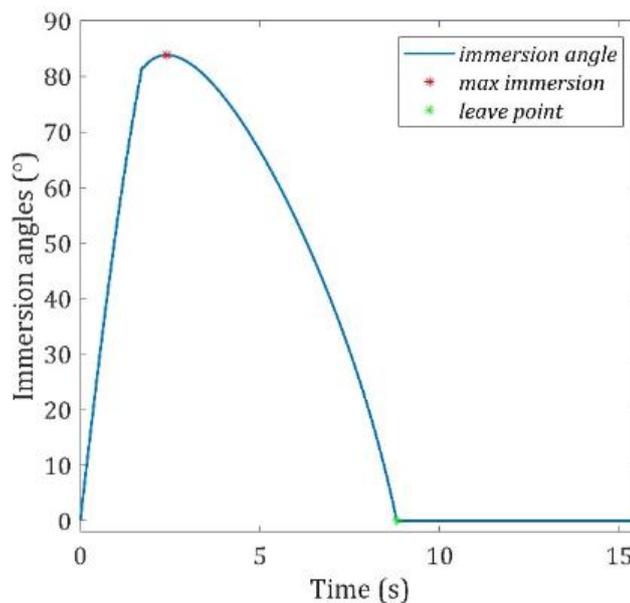
Fonte: adaptado de Uhlmann *et al.* (2020)

O *software* CAD/CAM construiu a trajetória a partir da interpolação linear de pequenos segmentos de reta (muitas vezes menores que  $100\ \mu\text{m}$ ). Isso gerou um tamanho de código extenso que, associado à elevada velocidade de avanço ( $v_f$ ), exigiu que mais de 200 etapas fossem processadas por segundo. Não sendo possível processar essas etapas no tempo determinado, a velocidade de avanço foi reduzida automaticamente pelo controlador. Isso levou a uma diminuição na taxa de remoção de material, e, portanto, a uma redução na relação custo-benefício. No caso estudado pelos autores, apenas 25% do valor especificado para velocidade de avanço foi alcançado durante a usinagem.

Outro ponto analisado pelos autores foi o desvio geométrico associado à largura do canal usinado, observou-se que conforme a velocidade de avanço ( $v_f$ ) aumenta, o desvio aumenta em relação à trajetória programada. Contudo, esse resultado pode estar associado à baixa rigidez do robô industrial em comparação a máquina-ferramentas convencionais (a exemplo de centros de usinagem CNC).

Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010), Wang *et al.* (2018) e Deng *et al.* (2020) afirmam que além de permitir o uso de uma baixa profundidade radial de usinagem ( $a_e$ ), o fresamento trocoidal apresenta um ângulo de contato ferramenta-peça também reduzido (máximo  $83,82^\circ$ , conforme mostrado na Figura 11) quando comparado ao fresamento de canal e cavidades com trajetória de contorno (máximo  $180^\circ$ ). Isso implica em redução dos esforços mecânicos sobre a ferramenta de corte e permite o uso de elevada profundidade axial de usinagem ( $a_p$ ), podendo utilizar o comprimento total da aresta de corte. A combinação desses parâmetros garante uma alta taxa de remoção de material no fresamento trocoidal. Além disso, o baixo ângulo de contato permite o uso de ferramentas com múltiplas arestas cortantes e elevado avanço por dente ( $f_z$ ), o que caracteriza uma importante vantagem do processo. Apesar disso, o fresamento trocoidal apresenta algumas limitações relatadas por Waszczuk *et al.* (2017), tais como: elevado tempo de movimento da ferramenta fora do contato com o material usinado, dificuldade no resfriamento da ferramenta devido ao uso de “ $a_p$ ” elevado; e redução da velocidade de avanço durante a usinagem ocasionado pela complexidade de processamento da trajetória pela máquina-ferramenta.

Figura 11 – Ângulo de contato ferramenta-peça no fresamento trocoidal

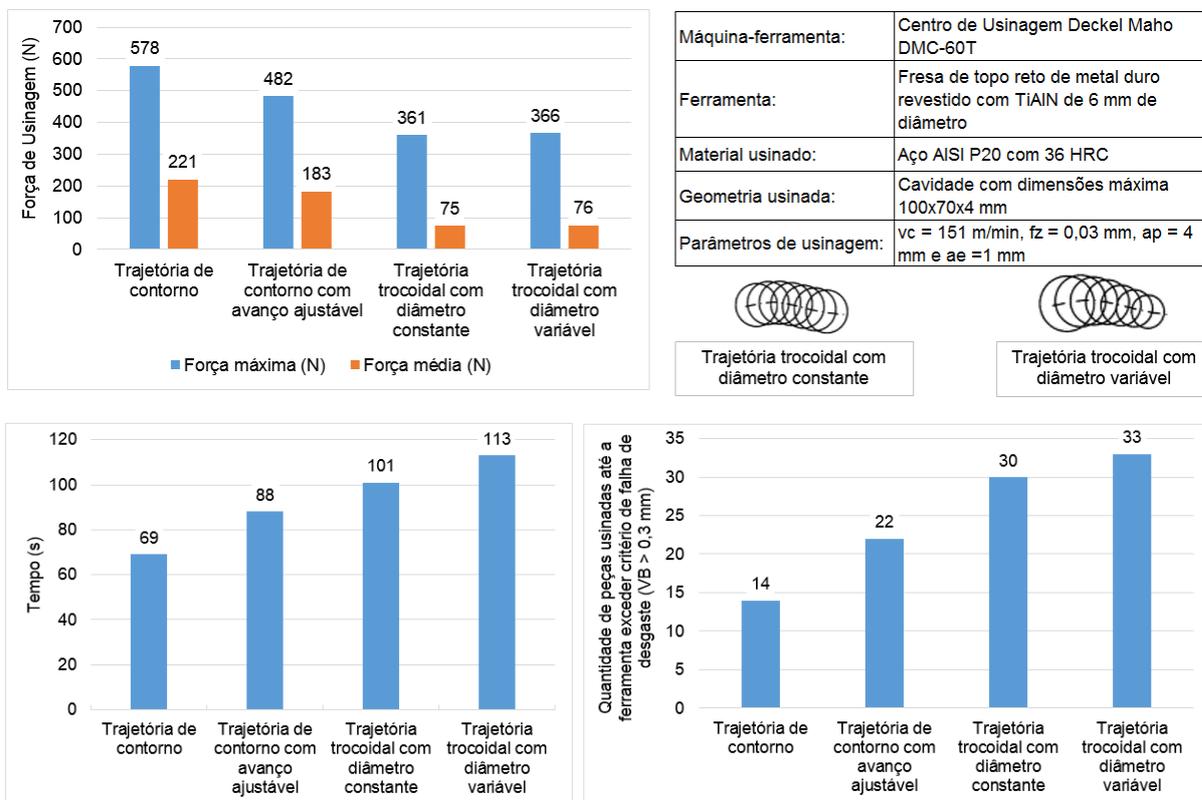


Fonte: Deng *et al.* (2020)

Embora o fresamento trocoidal apresente limitações significantes quanto ao tempo de movimento da ferramenta fora do contato com o material usinado, Shixiong *et al.* (2016) mostraram que a força de usinagem no fresamento trocoidal apresentou expressiva redução de magnitude quando comparada a força medida durante o uso da trajetória de contorno. Ainda, mostraram aumento da vida da ferramenta de corte quando usinaram cavidades em aço AISI P20 com dureza de 36 HRC utilizando uma fresa de metal duro revestido com TiAlN, conforme mostrado na Figura 12.

Na Figura 12, observa-se que Shixiong *et al.* (2016) analisaram quatro diferentes tipos de trajetórias: a trajetória de contorno, a trajetória de contorno com avanço ajustável, a trajetória trocoidal com diâmetro constante e a trajetória trocoidal com diâmetro variável. Ao comparar os valores de força máxima e média para todas as trajetórias analisadas, percebe-se que as menores forças foram registradas na usinagem com trajetórias trocoidais. Essa redução no esforço mecânico aumentou, conseqüentemente, o tempo de vida da ferramenta de corte em, aproximadamente, 55% quando comparado à trajetória de contorno. O aumento da vida da ferramenta possibilitou que a quantidade de peças usinadas com uma única ferramenta expandisse em torno de 125%. Esse resultado mostrou que o uso de estratégias trocoidais no fresamento pode aumentar a produtividade do processo de usinagem de aços-ferramenta, como o AISI P20 com 36 HRC.

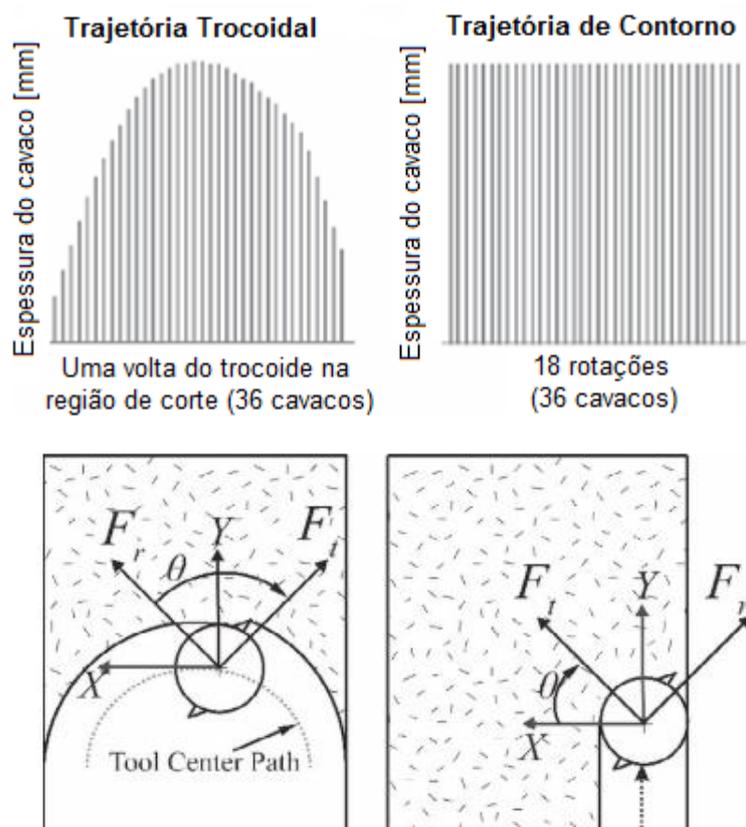
Figura 12 – Comparação da força de usinagem, tempo de vida da ferramenta e quantidade de peças usinadas entre quatro diferentes tipos de trajetórias de usinagem



Fonte: adaptado de Shixiong *et al.* (2016)

A redução dos esforços mecânicos no fresamento trocoidal quando comparado ao fresamento de canais também foi resultado do trabalho desenvolvido por Pleta, Niaki e Mears (2018). Os autores mostraram que a redução da força está relacionada à espessura do cavaco formado durante o fresamento. Na Figura 13, é mostrada uma comparação entre a espessura do cavaco produzido no fresamento trocoidal (para uma translação completa – que descreve um semicírculo) e o produzido no fresamento de canais com trajetória de contorno. O gráfico gerado para trajetória de contorno previu 18 rotações da ferramenta. Adotou-se esse valor, pois, independentemente da quantidade de rotações, a variação da espessura de cavacos na usinagem de um canal utilizando trajetória de contorno é constante. Pela análise da Figura 13, observa-se a variação contínua da espessura do cavaco no fresamento trocoidal comparada com a espessura uniforme do cavaco presente no fresamento de canais. Essa variação da espessura do cavaco provoca uma variação proporcional da força de usinagem, como discutido anteriormente.

Figura 13 – Comparação entre a espessura do cavaco produzido no fresamento trocoidal e no fresamento de canais com trajetória de contorno



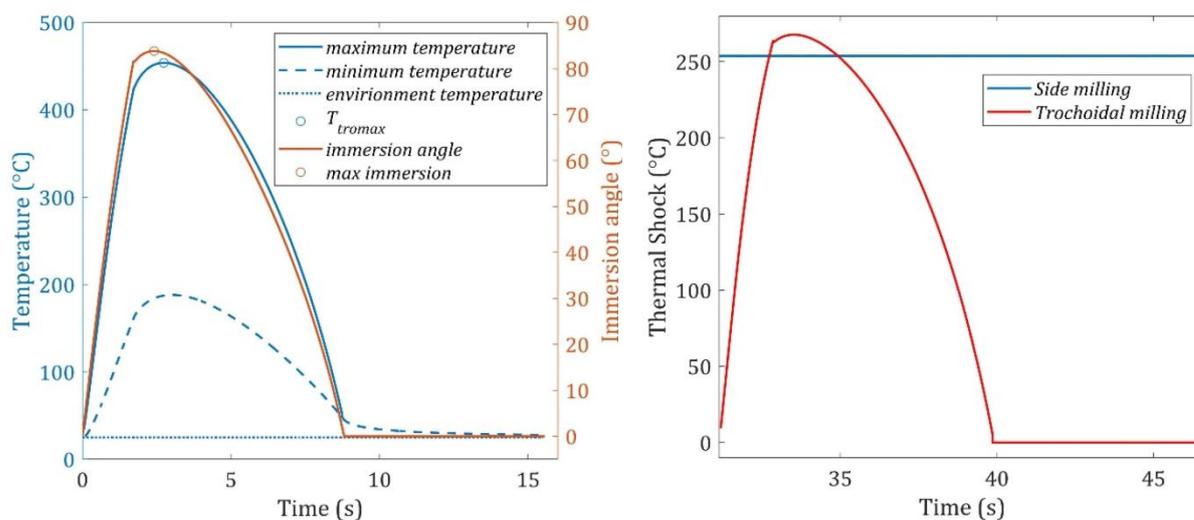
Fonte: adaptado de Pleta, Niaki e Mears (2018)

Estudos mostraram que o fresamento trocoidal provoca menos desgaste da ferramenta do que o fresamento de canal/contorno, ao remover o mesmo volume de material (SHIXIONG *et al.*, 2016 e WU *et al.*, 2012). Isso provoca o aumento da vida útil da ferramenta no fresamento trocoidal.

Uma vez que a temperatura de corte tem uma influência significativa no desgaste da ferramenta, uma comparação de temperatura entre fresamento com trajetória trocoidal e com trajetória de contorno foi estudada por Deng *et al.* (2020). Observou-se que o ângulo de contato ferramenta-peça tem uma influência significativa na temperatura máxima e mínima da ferramenta, conforme mostrado na Figura 14.a. Se o ângulo de contato ferramenta-peça aumentar, a temperatura da aresta de corte aumentará e vice-versa. Além disso, duas razões foram encontradas para decifrar os fenômenos de prolongamento da vida da fresa na usinagem trocoidal. A primeira razão é que a temperatura no fresamento trocoidal é mais baixa do que a temperatura do fresamento de contorno correspondente (ver Figura 14.c). A segunda razão é que

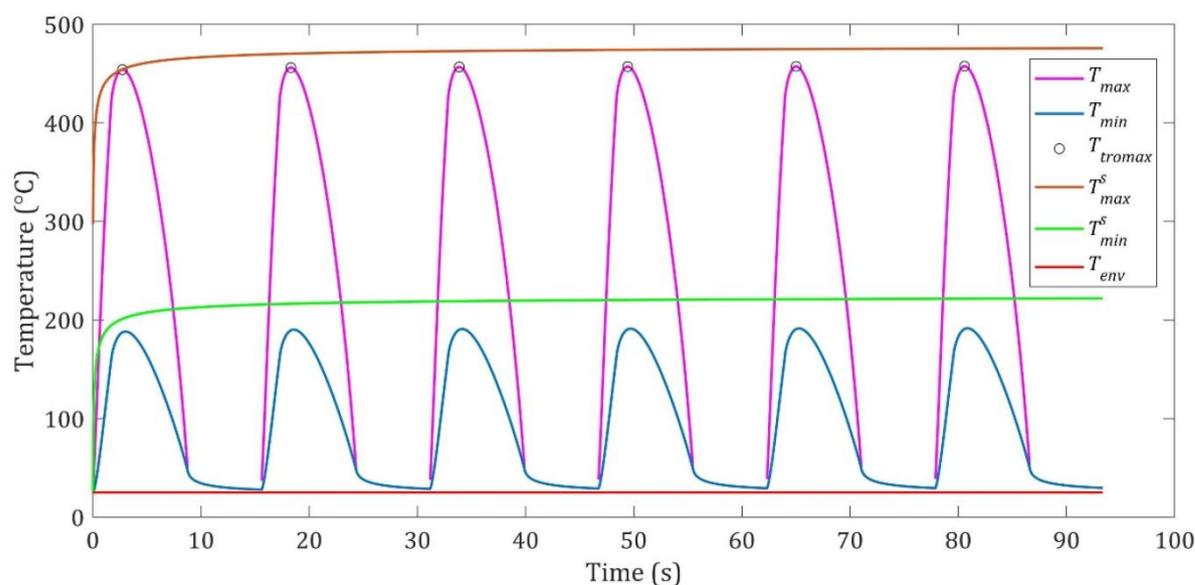
o choque térmico na usinagem trocoidal é muito menor do que o choque térmico para a trajetória de contorno correspondente (ver Figura 14.b). Esses dois fatores juntos fazem o fresamento trocoidal superar o fresamento de canais tradicional (com trajetória de contorno) no corte de materiais com baixo índice de usinabilidade, nos quais a temperatura de corte é sempre alta e a vida útil da fresa é geralmente curta.

Figura 14 – Análise da temperatura de corte no fresamento trocoidal. (a) comparação entre a temperatura de corte com o ângulo de contato ferramenta-peça; (b) choque térmico e (c) temperatura de corte para fresamento trocoidal e fresamento com trajetória de contorno



(a)

(b)



(c)

Fonte: Deng et al. (2020)

Embora conhecendo as características, vantagens e desvantagens do fresamento trocoidal, é necessário compreender as particularidades técnicas que envolvem a escolha adequada dos parâmetros e das condições de corte, dos tipos e materiais de ferramentas, entre outros, para execução satisfatória dessa estratégia de usinagem. Portanto, na próxima seção será discorrido sobre as ferramentas de corte aplicadas ao fresamento trocoidal. Serão apontadas as suas características e resultados de suas aplicações com base em análises de trabalhos sobre o tema e informações disponíveis em catálogos de fabricantes de ferramentas.

### 3.2 FERRAMENTAS DE CORTE PARA O FRESAMENTO TROCIDAL

O fresamento trocoidal é uma estratégia alternativa de caminho de ferramenta que demonstrou aumentar a produtividade, melhorar a vida útil da ferramenta e reduzir a força de usinagem. Para aplicar essa estratégia é fundamental conhecer as condições de corte e as ferramentas que podem ser utilizadas no processo.

Na Tabela 1 é mostrado um compilado de informações sobre o material usinado, o fluido refrigerante e a ferramenta de corte que foram utilizados nos principais trabalhos publicados sobre fresamento trocoidal.

Tabela 1 – Compilado de informações sobre material usinado, fluido refrigerante e ferramenta utilizados nos principais trabalhos publicados sobre fresamento trocoidal

<b>Autores</b>	<b>Material usinado</b>	<b>Fluido refrigerante</b>	<b>Ferramenta</b>
Otkur e Lazoglu (2007)	Al 7039	Não mencionado	Fresa de topo reto de metal duro (CoroMill Plura Sandvik) com duas arestas, 12 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento, 38 mm de comprimento de hélice e ângulo de hélice de 25°.
Rauch, Duc e Hascoet (2009)	Al 5086	Não mencionado	Fresa de topo reto com duas arestas e 32 mm de diâmetro.
Ibaraki, Yamaji e Matsubara (2010)	Aço AISI H13 endurecido para dureza de 53 HRC	Mistura ar/óleo pressurizada (0.5 MPa)	Fresa de topo reto de metal duro revestida com (Al, Ti, S)N com seis arestas, 10 mm de diâmetro, 40 mm de comprimento.
Polishetty <i>et al.</i> (2014)	Liga de titânio Ti-6Al-4V alfa-beta	Solução de 2,8% de fenol diluído em água na proporção 1:10	Fresa de topo reto inteiriça com quatro arestas e 12 mm de diâmetro (ISCAR-IC900).

Pleta, Ulutan e Mears (2015)	Superliga à base de níquel reforçada pela fase $\gamma'$	O fluido refrigerante foi usado em todos os testes, conforme recomendado pelo fabricante	Insertos de metal duro revestidos com TiAlN por PVD (Sandvik Coromill R390-11 T308M-PM-1030) montados em um porta-ferramenta com 2 arestas e 15,875 mm de diâmetro.
Salehi <i>et al.</i> (2016)	Aço AISI A570.36	Não mencionado	Fresa com pastilhas intercambiáveis com três arestas, 20 mm de diâmetro.
Pleta e Mears (2016)	Inconel 738	Emulsão com 6,5% de concentração.	Insertos de metal duro revestidos com TiAlN por PVD (Sandvik Coromill R390-11 T308M-PM-1030) montados em um porta-ferramenta com 2 arestas e 15,875 mm de diâmetro.
Shixiong <i>et al.</i> (2016)	Aço AISI P20 com 36 HRC	Não mencionado	Fresa de topo reto inteiriça de metal duro revestido com TiAlN de 6 mm de diâmetro
Pleta, Niaki e Mears (2017)	Al 7075-T651	Corte a seco	Insertos de metal duro revestidos com TiAlN por PVD (Sandvik Coromill R390-11 T308M-PM-1030) montados em um porta-ferramenta com 2 arestas e 15,875 mm de diâmetro.
Wang <i>et al.</i> (2018)	Al 6061	Não mencionado	Fresa de topo reto com 6 mm de diâmetro.
Luo, Hah e Hafeez (2019)	Liga de Alumínio não especificada	Não mencionado	Fresa de topo esférico com quatro arestas e 10 mm de diâmetro
Zagórski <i>et al.</i> (2019)	Liga de Magnésio AZ91D (MgAl9Zn1) e AZ31 (MgAl3Zn1)	Corte a seco	Fresa de topo reto inteiriças de metal duro com revestimento de TiAlN (Fenes Siedlce) com 2 arestas, 16 mm de diâmetro, dimensões 16 mm x 25 mm x 100 mm e 30° de ângulo de hélice.
Pleta <i>et al.</i> (2019)	Inconel 718	Emulsão com 6,5% de concentração, conforme recomendado pelo fornecedor (Fortech FT2005).	Insertos de metal duro revestidos com TiAlN (Sandvik Coromill R390-11 T308M-PM-1130) montados em um porta-ferramenta com 2 arestas e 15,875 mm de diâmetro. Ângulo de posição de 90°, ângulo de saída radial de 2,5° e axial de 12,4°.
Ducroux <i>et al.</i> (2019)	Inconel 718 com 45 HRC	Não mencionado	Fresa de topo reto inteiriça de metal duro (IMX10C4HV100R10010S EP7020) com quatro arestas, 10 mm de diâmetro, raio de ponta de 1 mm e 45° de ângulo de hélice.

Waszczuk <i>et al.</i> (2019)	Aço DIN145Cr6 com dureza de 58±2 HRC	Jato de ar pressurizado a 10 bar	Fresa de dente reto de metal duro inteiriças (EC-H7 10-20C10CF-M72), com 7 arestas, 10 mm de diâmetro e ângulo de hélice de 37°. Foi usado $a_p = 10$ mm em canal
Šajgalík <i>et al.</i> (2020)	Aço H11 com 58 HRC de dureza	Não mencionado	Fresa de topo reto de metal duro inteiriça (UNIFR41010xR1) com 10 mm de diâmetro, 4 arestas, e ângulo de hélice irregular (35° e 38°). Foi usado $a_p = 10$ mm em canal
Volosova <i>et al.</i> (2020)	Liga de titânio com 318 HB de dureza	Não mencionado	Fresa de topo reto inteiriça de metal duro com 4 arestas e 12 mm de diâmetro, 140 mm de comprimento total, 65 mm de comp. de aresta, 40° de ângulo de hélice.
Huang <i>et al.</i> (2020)	Aço inoxidável ASTM A565	À seco	Fresa de topo reto de metal duro 554200Z4.1-SIRON-A com quatro arestas, 20 mm de diâmetro e 48° de ângulo de hélice.
Uhlmann <i>et al.</i> (2020)	Aço AISI P20	Não mencionado	Fresa de topo reto inteiriça de metal duro com 6 mm de diâmetro e 18 mm de comprimento de aresta (processo: fresamento de canal)

Fonte: Autoria própria (2025)

Analisando a Tabela 1, observa-se que o fresamento trocoidal pode ser aplicado na usinagem de uma grande variedade de materiais, desde materiais com alto índice de usinabilidade (como a baquelite, as ligas de magnésio e as ligas de alumínio) até os materiais com baixo índice de usinabilidade (como os aços-ferramenta endurecidos, as ligas de titânio e as superligas de níquel). Sobre o tipo de ferramenta comumente utilizado, destaca-se o uso de fresas de topo reto de metal duro (inteiriças ou com insertos intercambiáveis), geralmente revestidas por TiAlN, com diâmetro variando de 6 a 32 mm.

Métodos de resfriamento eficazes podem melhorar significativamente a vida útil da ferramenta, diminuindo a temperatura da aresta de corte (LIU *et al.*, 2019). Muitos autores não relataram a condição de lubri-refrigeração utilizada no fresamento trocoidal. Contudo, para os autores que a relataram (ver Tabela 1), constata-se que na usinagem de materiais com baixo índice de usinabilidade foram utilizados, em sua maioria, métodos de refrigeração com fluido refrigerante em abundância (emulsão de

água e óleo), e, pontualmente, método de mínima quantidade de lubrificação (MQL) utilizando mistura ar/óleo pressurizada. Entretanto, não é possível descartar a possibilidade da usinagem a seco para os autores que não relataram o tipo de lubrificação.

No fresamento trocoidal, o pequeno ângulo de contato entre a ferramenta e a peça gera baixa força de usinagem, e um longo período de não contato entre a ferramenta e a peça garante o resfriamento eficaz da ferramenta. Portanto, essas vantagens permitem uma vida útil longa da ferramenta no fresamento trocoidal (Luo; Hah; Hafeez, 2019).

Entre os trabalhos destacados na Tabela 1, vale ressaltar o estudo de Waszczuk *et al.* (2019), que aplicou o fresamento trocoidal em aço DIN145Cr6 ( $58 \pm 2$  HRC) utilizando fresa EC-H7 da Iscar. Os autores demonstraram que, mesmo em materiais com elevada dureza, a combinação de ferramentas com múltiplas arestas e passo diferencial pode garantir boa remoção de cavacos e estabilidade dimensional, sendo este um indicativo importante para a seleção da ferramenta utilizada neste trabalho. A adoção de fresas similares com sete arestas e  $a_p = 10$  mm nos testes experimentais aqui apresentados encontra respaldo nos bons resultados obtidos por Waszczuk *et al.* (2019), especialmente no que se refere ao desempenho térmico e estabilidade do processo em canais profundos.

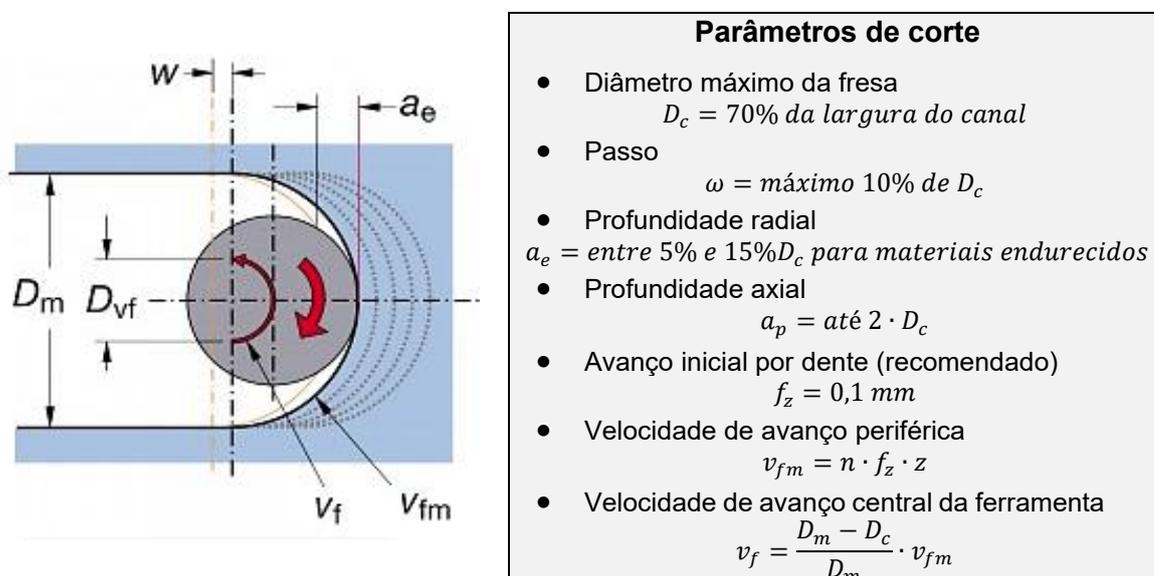
Ainda mais importante do que a escolha de ferramentas que os autores dos principais trabalhos publicados sobre fresamento trocoidal optaram é a recomendação que os fabricantes de ferramentas fazem a respeito do tema. Portanto, a seguir serão apresentadas as recomendações de quatro fabricantes de ferramentas de corte (Sandvik Coromant, Seco Tools, YG1 e Iscar) para o fresamento trocoidal.

O fabricante de ferramentas Sandvik Coromant (2025) recomenda o uso de fresas de arestas longas, a fim de aproveitar a possibilidade da utilização de uma profundidade de corte axial ( $a_p$ ) grande (até duas vezes o diâmetro da fresa) combinada a uma profundidade de corte radial ( $a_e$ ) pequena (no máximo 20% do diâmetro da fresa). Além disso, é destacado que o método de fresamento trocoidal pode ser aplicado no desbaste e semidesbaste de materiais de baixo índice de usinabilidade como aços endurecidos e temperados com dureza entre 45 e 68 HRC (classe ISO H), superligas de titânio (classe ISO S), ligas à base de níquel, de ferro

ou de cobalto (superligas resistentes ao calor – materiais HRSA) e, destaca-se ainda seu emprego em outros materiais, especialmente, em aplicações sensíveis à vibração. Sandvik Coromant (2025) também ressalta que o fresamento trocoidal fornece um custo de ferramenta mais baixo comparado com o fresamento de canais tradicional ou em mergulho, pois uma ferramenta de 12 mm pode ser substituída por uma ferramenta de 8 mm para usinar o mesmo canal. Ademais, o fabricante recomendou os parâmetros de corte, mostrados na Figura 15, que são adequados para a aplicação da estratégia trocoidal no fresamento.

As recomendações dos fabricantes foram consideradas no delineamento experimental deste estudo. Por exemplo, a Sandvik Coromant sugere o uso de profundidade axial de corte ( $a_p$ ) de até duas vezes o diâmetro da fresa. No presente trabalho, foi adotado  $a_p = 10$  mm para uma fresa de 10 mm de diâmetro, o que representa  $a_p = 1 \cdot D_c$ , perfeitamente alinhado às diretrizes do fabricante para fresamento trocoidal em materiais endurecidos. Essa escolha buscou garantir o uso eficiente da aresta de corte, mantendo a estabilidade térmica e a integridade da ferramenta, conforme também apontado por Waszczuk *et al.* (2019).

Figura 15 – Parâmetros de corte recomendados para o fresamento trocoidal



Fonte: adaptado de Sandvik Coromant (2025)

O fabricante de ferramentas Seco Tools (2020) recomenda o uso de fresas JS554-2C/3C para aplicações de fresamento trocoidal. Tais fresas são inteiriças de metal duro com quatro arestas de corte, ângulo de hélice de  $48^\circ$ , diâmetro que varia de 6 a 25 mm e podem ser aplicadas na usinagem de materiais classes ISO P, M, K,

N, S e H. Na usinagem de abertura de canais em materiais da classe ISO H, o fabricante recomenda lubrificação a ar, spray ou à seco, para os demais materiais, a recomendação é lubrificação abundante com emulsão de óleo e água. Além das recomendações citadas, Seco Tools (2020) apresenta valores de largura mínima de canal indicados para diferentes tamanhos de fresa, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Largura mínima de canal indicado para diferentes diâmetros de fresas

<i>Diâmetro da fresa (Dc)</i>	<i>Largura do canal</i>
1 mm – 2,5 mm	1,8 x Dc
3 mm – 6 mm	1,6 x Dc
8 mm – 12 mm	1,4 x Dc
16 mm – 32 mm	1,2 x Dc

Fonte: adaptado de Seco Tools (2020)

Assim como a Seco Tools, o fabricante YG1 (2020) faz recomendações específicas de ferramentas para aplicações de fresamento trocoidal. Esse fabricante recomenda as fresas inteiriças de metal duro V7 Plus com seis arestas de corte, ângulo de hélice de 45°, diâmetro entre 6 e 25 mm e destaca vantagens como redução de vibração e ressonância proporcionando maior estabilidade e melhor acabamento. Contudo, essas fresas são recomendadas apenas para a usinagem de materiais classe ISO P, M, K e S (exclusivamente para materiais com dureza inferior a 40 HRC).

O fabricante de ferramentas Iscar Tool (2021) também traz recomendações específicas para aplicações de fresamento trocoidal. São recomendadas as fresas da família EC-H7 caracterizadas por serem fresas de topo reto revestidas por PVD com TiAlN possuindo sete arestas de corte, ângulo de hélice de 37° e diâmetro entre 6 e 20 mm. Essas fresas possuem passo diferencial que possibilita maior estabilidade ao corte e são recomendadas para usinagem com profundidade radial de corte de até 10% do diâmetro da fresa ( $a_e = máx 0,1 \cdot D_c$ ). Segundo o fabricante, os canais das ferramentas são projetados para remoção eficiente do cavaco, mesmo trabalhando com elevada profundidade axial de corte. Além disso, essas ferramentas podem ser utilizadas na usinagem de materiais da classe ISO P, M, K, S e H. Os autores Waszczuk *et al.* (2019) utilizaram fresas da família citada para o fresamento trocoidal de canais em aço DIN145Cr6 com dureza de  $58 \pm 2$  HRC e obteve resultados satisfatórios.

Pela análise dos trabalhos publicados sobre o fresamento trocoidal e das recomendações dos fabricantes de ferramentas observa-se que o material de ferramenta mais adequado para aplicações de fresamento trocoidal é o metal duro (Liga de carboneto de tungstênio e cobalto – WC-Co). Sobre esse material, Trent e Wright (2000) destacam que ele está disponível comercialmente com teores de cobalto entre 4% e 30% em peso (sendo aqueles com teor de cobalto entre 4% e 12% comumente usados para corte de metais) e com grãos de carboneto com tamanhos variando de 0,5 µm a 10 µm de diâmetro.

O desempenho das ferramentas de corte de metal duro depende muito da composição química e do tamanho do grão de carbonetos. Carbonetos de tungstênio garantem maior resistência ao desgaste e maior quantidade de cobalto garante maior tenacidade à ferramenta. Ferramentas mais tenazes são desejadas em cortes pesados de desbaste, em velocidades mais baixas e quando há vibrações significativas na usinagem. Os metais duros convencionais são classificados de acordo com sua aplicação. A Tabela 2 mostra as classes de WC-Co de acordo com a norma ABNT NBR ISO 513:2013.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 513:2013, apenas as classes “P” são projetadas para operar em condições suficientemente severas, justificando os números de classificação 45 e 50 para resistência ao desgaste/tenacidade. As classes “M” e “K” podem ter número de classificação até 40, e os grupos restantes (N, S e H) podem ser atribuídos números de classificação não maiores do que 30 para resistência ao desgaste/tenacidade.

Tabela 2 – Classificação do metal duro de acordo com a aplicação

Grupo principal de aplicação			Grupo de aplicação			
Letra de Identificação	Cor de Identificação	Materiais a serem usinados	Materiais duros para corte		-	
P	azul	<b>Aço:</b> todos os tipos de aço e aço fundido, exceto aço inoxidável, com estrutura austenítica.	P01	P05	a↑	b↓
			P10	P15		
			P20	P25		
			P30	P35		
			P40	P45		
			P50			
M	amarela	<b>Aço Inoxidável:</b> aço inoxidável austenítico e aço austenítico/ferrítico e aço fundido.	M01	M05	a↑	b↓
			M10	M15		
			M20	M25		
			M30	M35		
			M40			
K	vermelha	<b>Ferro fundido:</b> ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K01	K05	a↑	b↓
			K10	K15		
			K20	K25		
			K30	K35		
			K40			
N	verde	<b>Materiais não ferrosos:</b> alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos.	N01	N05	a↑	b↓
			N10	N15		
			N20	N25		
			N30			
S	marrom	<b>Superligas e titânio:</b> ligas especiais, resistentes às altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S01	S05	a↑	b↓
			S10	S15		
			S20	S25		
			S30			
H	Cinza	<b>Materiais com alta dureza:</b> Aço temperado, materiais de aço fundido temperado, aço fundido com coquilha.	H01	H05	a↑	b↓
			H10	H15		
			H20	H25		
			H30			

**a** A diminuição do número associado à letra de identificação resulta no aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.

**b** O aumento do número associado à letra de identificação resulta no aumento da tenacidade.

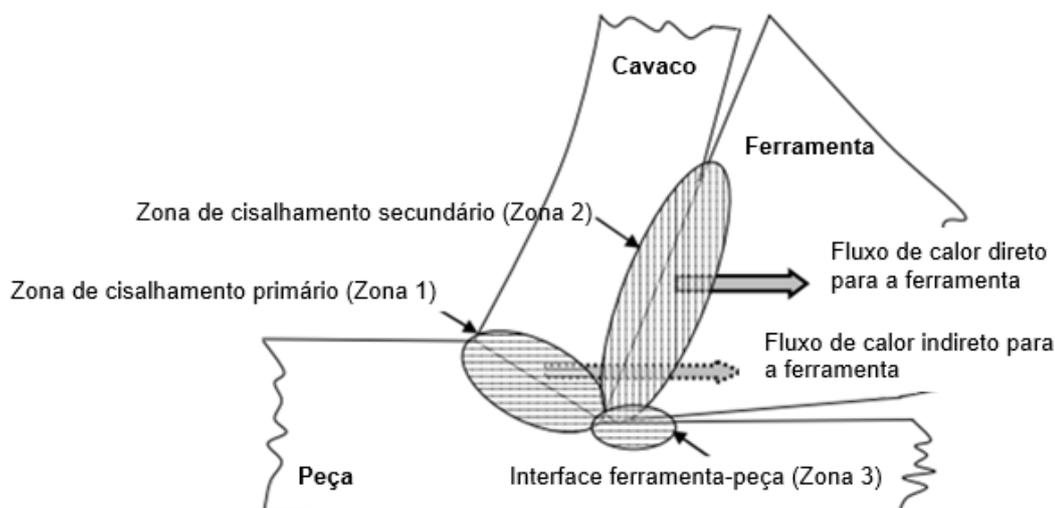
Fonte: ABNT NBR ISO 513 (2013)

### 3.3 MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES PARA A USINAGEM

Um dos aspectos-chave da usinagem é a tribologia das interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça, onde as condições de contato são severas e as temperaturas são muito altas. O entendimento e estimativa das tensões de contato e da temperatura nessas interfaces podem ajudar na seleção de uma estratégia eficaz de resfriamento/lubrificação durante o corte de metal (Singh; Bajpai, 2015).

Sabe-se que a formação de cavaco durante a usinagem de metais, induz severa deformação plástica na zona de cisalhamento primário e alto atrito na zona de cisalhamento secundário, de modo que o trabalho plástico e as perdas por atrito são convertidos em calor. Durante o processo de usinagem, existem principalmente três regiões onde o calor é gerado: a zona de cisalhamento primário (zona 1), a zona de cisalhamento secundário (zona 2) e a zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (zona 3), conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Zonas de geração de calor durante a usinagem



Fonte: Fahad (2012).

Assim que a aresta da ferramenta de corte faz contato e começa a cisalhar a peça, o calor é gerado na Zona 1. A geração de calor nessa região se deve ao trabalho plástico realizado no plano de cisalhamento. O calor produzido nesta Zona 2 é devido ao trabalho realizado na superação do atrito deslizante no contato entre o cavaco e a ferramenta, na superfície de saída. O calor produzido nesta zona é o principal responsável pelo desgaste da cratera na superfície de saída. Na Zona 3, o calor é

gerado devido ao trabalho realizado para superar o atrito que ocorre no contato de fricção entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada. O calor gerado nesta zona leva ao desgaste de flanco da ferramenta. Embora as zonas de geração de calor sejam pequenas, as temperaturas podem subir a um nível crítico de até 1000 – 1200°C (TRENT; WRIGHT, 2000; DOGU et al., 2006; FAHAD, 2012).

Manipular a aplicação de meios lubri-refrigerantes<sup>(1)</sup> (também chamados fluidos de corte, óleos de corte, meios de lubrificação e arrefecimento, líquidos refrigerantes, etc.) é uma forma de gerenciar as temperaturas geradas nas operações de usinagem. O emprego de meios lubri-refrigerantes tem por finalidade auxiliar o processo de usinagem proporcionando ação de refrigeração e lubrificação com o objetivo de aumentar a vida da ferramenta, aumentar a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento superficial e reduzir a força e potência de corte (Stemmer, 2007).

A ação de **refrigeração** atua na “dissipação” do calor gerado no processo do corte e é, especialmente, importante em altas velocidades de corte, quando se utiliza ao máximo as possibilidades da ferramenta e a temperatura da aresta se aproxima do ponto de amolecimento. Enquanto a ação de **lubrificação** atua na “diminuição” do calor gerado, visto que objetiva reduzir o atrito gerado durante a formação do cavaco. Contudo, a medida que se aumenta a velocidade de corte, o tempo para a entrada do fluido entre as superfícies atritantes se torna insuficiente, perdendo-se progressivamente o efeito lubrificante (Stemmer, 2007).

Dentre as funções dos meios lubri-refrigerantes, a ASME (1952 apud Singh e Bajpai, 2015) cita:

- a) Reduzir a temperatura da ferramenta de corte para que a resistência mecânica e a integridade química sejam mantidas;
- b) Manter a temperatura da peça baixa para evitar expansão/danos térmicos e corrosão;

---

(1) O termo "meios lubri-refrigerantes", usado pelo autor Stemmer (2007) e por esse trabalho, se refere a qualquer substância (ou mistura) usada para lubrificar e/ou refrigerar uma operação de corte.

- c) Reduzir o consumo de energia e o desgaste da ferramenta, reduzindo o atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça;
- d) Evitar a formação de aresta postiça de corte (APC), por exemplo, pela lubrificação da face da ferramenta (na superfície de saída) por fluidos com aditivos de extrema pressão ou por óleos graxos;
- e) Fornecer assistência na formação e fluxo de cavacos;
- f) Auxiliar na remoção de cavacos, especialmente, de usinagem estreita ou profunda, por exemplo, furação profunda, fresamento, etc.;
- g) Fornecer uma camada resistente à corrosão na superfície de metal recém-cortada para evitar a oxidação e também na máquina-ferramenta. Isso obriga, no caso de utilização de água, que tem excelentes qualidades de refrigeração, o emprego de óleos com emulsificadores ou de aditivos anti-corrosão;
- h) Fornecer lubrificação às peças da máquina próximas à área de usinagem.

### 3.3.1 Tipo de meios lubri-refrigerantes

De acordo com Stemmer (2007), os meios lubri-refrigerantes empregados na usinagem podem ser classificados como:

- a) Meios de lubri-refrigeração miscíveis com a água (fluidos de corte a base de água): soluções aquosas e emulsões;
- b) Meios de lubri-refrigeração não miscíveis com a água (fluidos de corte a base de óleo): óleos minerais, óleos sintéticos e semissintéticos;
- c) Gases e névoas: jato de ar pressurizado, MQL (*Minimum Quantity Lubrication*);
- d) Sólidos: bissulfeto de molibdênio.

Além desses, é possível citar ainda o uso de fluidos criogênicos (por exemplo, nitrogênio líquido) e a usinagem a seco. Essa última pode oferecer vantagens de custo e flexibilidade de máquina-ferramenta.

Os fluidos de corte à base de água apresentam excelentes propriedades de resfriamento, atribuídas ao alto calor específico da água (4,2 J/g·K), significativamente

superior ao dos óleos minerais (aproximadamente  $1,9 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ ). Além disso, a baixa viscosidade da água favorece a evacuação eficiente dos cavacos, tornando esses fluidos especialmente adequados para operações em que o controle térmico é crítico e a remoção de material intensa (Wang *et al.*, 2023; Tang *et al.* 2022).

Soluções aquosas são obtidas a partir da diluição de concentrados orgânicos ou inorgânicos solúveis em água, como sais alcalinos, nitrito de sódio, boratos e alcanolaminas, frequentemente empregados para prevenir a corrosão. Essas soluções podem ser aditivadas com agentes “molhantes”, que favorecem o deslizamento adequado de componentes móveis da máquina-ferramenta, e com aditivos de extrema pressão (EP), utilizados em condições severas de corte. Para melhorar suas propriedades lubrificantes, adiciona-se, por vezes, uma pequena fração de óleo mineral combinada com aditivos especiais, originando os chamados fluidos semissintéticos.

As emulsões, por sua vez, são formadas pela mistura de óleo e água, estabilizadas com agentes emulsificantes que mantêm o óleo disperso em microgotículas, formando um fluido leitoso. Essas emulsões oferecem melhor proteção contra a corrosão em comparação com as soluções puramente aquosas e demonstram desempenho superior em operações de usinagem que envolvem altas temperaturas e esforços intensos de corte. Conforme demonstrado por Wang *et al.* (2023), sua estrutura dispersa favorece a formação de filmes lubrificantes estáveis, resultando em menor atrito e desgaste das ferramentas, além de maior estabilidade térmica.

Os fluidos de corte totalmente à base de óleo, compostos por óleos graxos e minerais, são reconhecidos por sua alta capacidade lubrificante, sendo mais eficazes na redução do coeficiente de atrito durante a usinagem de baixa velocidade, onde a ferramenta é repetidamente exposta ao fluido. Esses óleos podem ser utilizados puros ou combinados com aditivos polares e/ou químicos, ativos ou inativos. No entanto, apresentam desvantagens significativas, como custo elevado, riscos de inflamabilidade, formação de névoas prejudiciais e efeitos adversos à saúde ocupacional, fatores que restringem sua aplicação em ambientes industriais modernos (Tang *et al.*, 2022).

A usinagem a seco foi o mais antigo método criado pelos pesquisadores para ser sustentável e não agressivo ao meio ambiente (Pusavec *et al.*, 2014). É o melhor método para eliminar o uso de fluido de corte e assim reduzir os custos de produção e os perigos ecológicos (Shockani *et al.*, 2012). Além disso, a usinagem a seco pode oferecer vantagens de custo e flexibilidade de máquina-ferramenta devido a não necessidade de grandes reservatórios de armazenamento de fluido. Alguns processos podem ser facilmente executados mesmo sem fluido de corte, por exemplo, ferro fundido pode ser facilmente usinado sem refrigeração se a ferramenta for orientada adequadamente para facilitar o escoamento dos cavacos. As peças de alumínio podem ser torneadas e fresadas com ferramentas de diamante policristalino (PCD) sem problemas. Revestimentos especiais de ferramentas de baixo atrito e arquitetura de máquina podem ajudar ainda mais na usinagem a seco (Singh; Bajpai, 2015).

### 3.3.2 Seleção do meio lubri-refrigerante: impacto no corte

A seleção adequada do meio lubri-refrigerante depende diretamente dos objetivos técnicos da operação, como o aumento da produtividade, prolongamento da vida útil da ferramenta, evacuação eficiente de cavacos e melhoria do acabamento superficial. Em operações realizadas com baixas velocidades de corte, como abertura de roscas, furação profunda e geração por plainagem, recomenda-se o uso de fluidos com alto poder de lubrificação, especialmente aqueles à base de óleo com aditivos de extrema pressão (EP). Essa escolha favorece a redução do atrito e a proteção da ferramenta em condições de contato prolongado com a peça (Wang *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2022).

Por outro lado, em processos de usinagem realizados em altas velocidades de corte, como torneamento, fresamento e furação rápida, são preferidas emulsões ou soluções aquosas, devido à sua elevada capacidade de dissipação térmica e ao melhor desempenho na remoção de cavacos. A forma de aplicação desses fluidos — incluindo volume, pressão e posicionamento dos jatos — deve ser criteriosamente ajustada conforme o processo. No fresamento, por exemplo, recomenda-se a aplicação de dois jatos laterais diretamente na zona de corte, garantindo refrigeração e limpeza eficazes.

Além das condições operacionais, o tipo de material usinado também influencia significativamente a escolha do fluido de corte. Para aços de usinabilidade normal — como os aços de cementação, beneficiamento e construção — indicam-se emulsões e soluções comuns. Já para aços de usinabilidade difícil — como aços de alta liga, Cr de alta liga, CrNi e aço fundido — recomenda-se o uso de emulsões com aditivos EP e óleos altamente aditivados. Nos casos mais severos, como na usinagem de aços de difícil usinabilidade (ex.: aço manganês, MnSi, CrMo e aços silício), é indispensável a utilização de óleos EP puros e de alta performance (Stemmer, 2007).

A tecnologia empregada na ferramenta de corte também limita ou facilita a aplicação de diferentes meios de lubri-refrigeração. Metal duro não oferece problema para a maioria dos meios lubri-refrigerantes bem formulados, contudo ele não suporta choques térmicos devido a sua elevada dureza. Cerâmica é usualmente empregada a seco e diamante, por vezes, é refrigerado por soluções aquosas.

Além das considerações teóricas sobre a sensibilidade de ferramentas de metal duro ao choque térmico, estudos como o de Ducroux *et al.* (2019) evidenciam que, durante o fresamento trocoidal de superligas como o Inconel 718, o uso contínuo de fluido de corte pode provocar fissuras na aresta de corte, principalmente quando associado a grandes profundidades axiais. A alternância térmica intensa causada pela aplicação intermitente de fluido em regiões profundas deve ser considerada, especialmente ao usinar canais como os avaliados neste trabalho, onde a trajetória da ferramenta resulta em contato variável com a região refrigerada.

### 3.4 PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS CNC

A usinagem utilizando máquinas controladas por comando numérico computadorizado (CNC) proporcionou a possibilidade de fabricação de peças complexas com maior qualidade, confiabilidade e precisão, uma vez que removeu, em parte, a variabilidade da intervenção humana (Souza; Ulbrich, 2013).

O programa de instruções, chamado usualmente como programa CNC, é estruturado na forma de blocos de informações, criados por caracteres convencionais ASCII. A geração de um programa CNC pode ser realizada de forma manual ou por auxílio de um *software* de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM). De acordo

com Souza e Ulbrich (2013), independentemente da forma adotada, os dados necessários para a elaboração de um programa CNC não sofrerão alteração e podem ser classificados em:

- a) **Dados geométricos:** utilizados para descrever o percurso da ferramenta. Incluem, principalmente, dimensões (como comprimento, largura, altura, raio, chanfros, etc.) e formas de segmentos (linear, circular ou parabólica).
- b) **Condições de corte:** dependem da tolerância e rugosidade superficial requeridas e do material de peça e da ferramenta. Incluem, principalmente, velocidade de corte, avanço, velocidade de rotação do eixo-árvore, profundidades de corte e tipo de refrigeração.
- c) **Informações sobre comando e máquina a serem utilizados:** incluem, principalmente, funções disponíveis, sintaxe específica, potência instalada e deslocamento máximos dos eixos controlados.

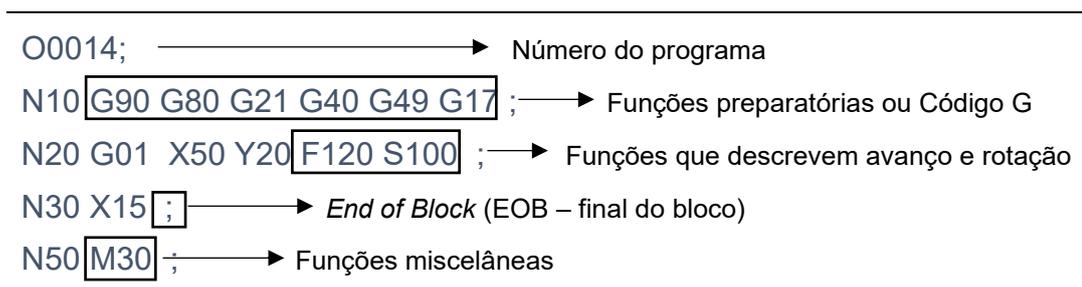
Conhecendo esses dados, o programador pode produzir com precisão um programa CNC para a usinagem de uma peça.

### 3.4.1 Estrutura de um programa CNC

Os programas CNC listam as instruções a serem executadas na ordem em que foram escritas. Eles leem como um livro, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Cada frase em um programa CNC é escrita em uma linha separada, chamada de Bloco (Suh *et al.*, 2008).

Os blocos de um programa CNC apresentam códigos que descrevem os comandos de movimentação da ferramenta e/ou mesa de trabalho e os comandos de acionamento e de preparação para usinagem. Alguns elementos encontrados nos programas CNC são mostrados na Figura 18.

Figura 18 – Formato do programa CNC



Fonte: adaptado de Suh *et al.* (2008)

Geralmente, em um programa CNC simples, os blocos são organizados na seguinte ordem: início do programa, carregamento da ferramenta, acionamento do eixo-árvore, acionamento do fluido refrigerante, deslocamento rápido até um ponto de segurança próximo à peça, operação de usinagem, desligamento do fluido refrigerante, desligamento do eixo-árvore, deslocamento até uma posição segura e fim do programa (pelo código M30).

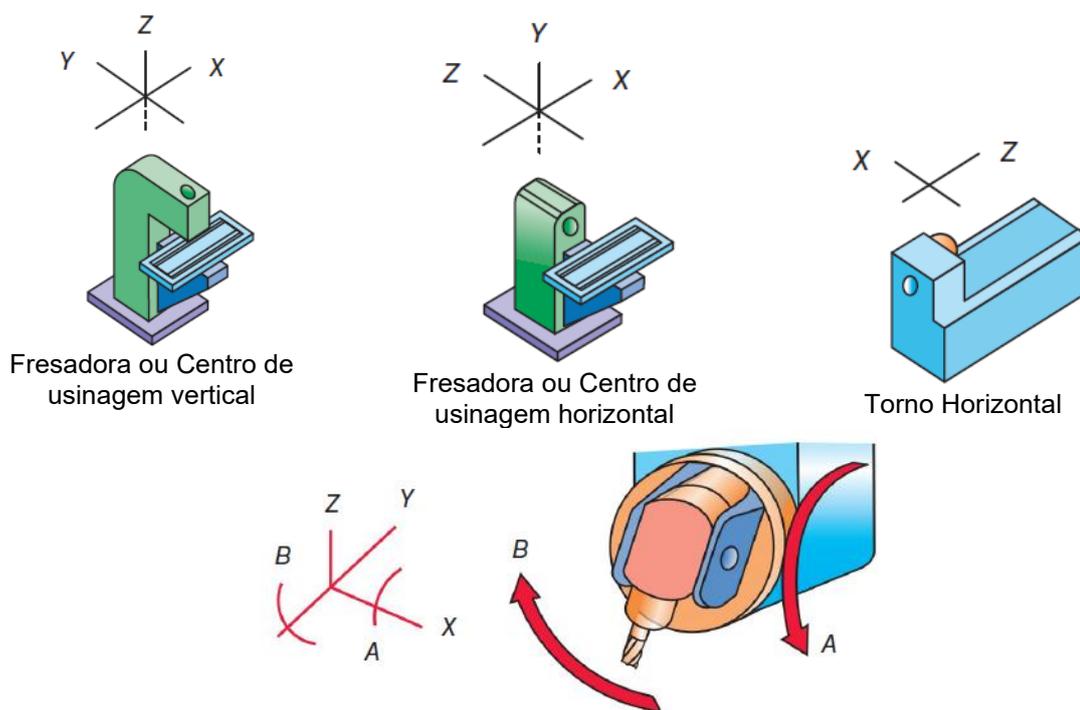
As duas principais funções presentes no programa CNC são as funções preparatórias e as funções miscelâneas. Tanto as funções quanto os comandos utilizados para a programação podem ser modais ou não modais. Os **modais** são àqueles que permanecem ativos em blocos posteriores, a menos que outra função os anule. Enquanto que os **não modais** requerem programação todas as vezes que forem utilizados (Souza; Ulbrich, 2013).

As **funções preparatórias** ou "Códigos G" são iniciadas pela letra "G" precedida de um ou mais números. Elas geralmente informam ao controle que tipo de movimento é desejado (por exemplo, posicionamento rápido, avanço linear, avanço circular, ciclo fixo etc.) ou qual valor de deslocamento usar. O bloco N10, ilustrado na Figura 18, é um bloco de segurança, assim chamado por conter funções para cancelar os comandos modais que estavam em vigor em programas anteriores. Ele contém as funções G90, G80, G21, G40, G49 e G17, onde: G90 refere-se à programação em um sistema de coordenadas absoluto (todas as dimensões correspondem a uma origem fixa que é o Zero da Peça); G80 é inserido no início do programa para garantir que todas as funções de ciclo fixo sejam canceladas; G21 inicia o sistema de medição em milímetros; G40 garante que todas as funções de compensação do diâmetro da ferramenta sejam canceladas; G49 cancela todas as compensações de comprimento da ferramenta; e G17 seleciona o plano XY (Evans, 2007).

A letra "M" é reservada para identificar as **funções miscelâneas**. Elas controlam os componentes que ativam e desativam o fluxo de refrigerante, a rotação do fuso, a direção da rotação do fuso e atividades semelhantes (Evans, 2007).

A Figura 19 mostra como se dá a orientação dos eixos "X", "Y", "Z", "A" e "B" nas fresadoras e/ou centros de usinagem verticais e horizontais, tornos horizontais e centro de usinagem de 5 eixos com eixo-árvore articulado (Fitzpatrick, 2014).

Figura 19 – Orientação dos eixos nas fresadoras e/ou centros de usinagem verticais e horizontais, tornos horizontais e centro de usinagem 5 eixos com eixo-árvore articulado



Centro de usinagem 5 eixos com eixo-árvore articulado para eixo A e B.

Fonte: Fitzpatrick (2014)

O avanço ou a velocidade de avanço utilizada no corte é identificado pela letra "F" e para especificar a velocidade de rotação do eixo-árvore, utiliza-se a letra "S" seguida por um valor numérico em rotações por minuto (rpm). Esse comando é sempre acompanhado dos códigos M03 (rotação no sentido horário) ou M04 (rotação no sentido anti-horário) para indicar o sentido de rotação do eixo-árvore. A função da ferramenta acionada pela letra "T" é utilizada para preparar e selecionar a ferramenta apropriada do magazine para o eixo-árvore, como mostrado na Figura 20.

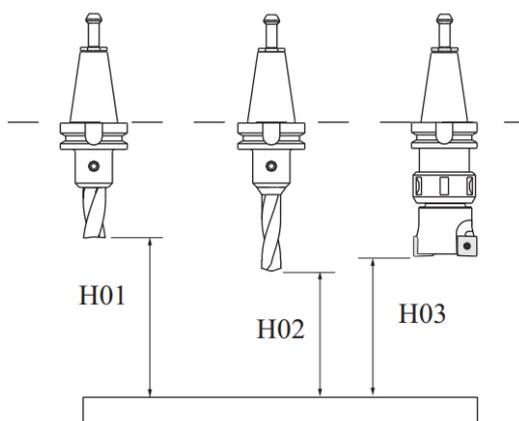
Figura 20 – Exemplo de linhas de um programa CNC

N10	G54	M6 T2	G21	G90
Identificação da linha	Identificação do zero-peça	Pega a ferramenta na posição 2 do magazine.	Coordenadas em milímetro	Coordenadas absolutas
N20	G01 F1000	X10 Y5 Z2	M8	M3 S2000
Identificação da linha	Interpolação linear e velocidade de avanço 1000 mm/min	Coordenadas de posição	Liga fluido de corte	Velocidade de rotação de 2000 rpm em sentido horário

Fonte: adaptado de Souza e Ulbrich (2013)

Cada ferramenta de corte possui comprimentos e diâmetros específicos, e a possibilidade de fixá-las no porta-ferramenta adotando diferentes comprimentos aumenta bastante a chance de ocorrer erros durante a execução da usinagem caso não seja informado ao controlador essas dimensões. Portanto, a referência dimensional das ferramentas (deslocamentos do comprimento e diâmetro) deve ser compensada. O valor da compensação do comprimento da ferramenta “H” para uma determinada ferramenta corresponderá, então, à distância entre a ponta da ferramenta e a superfície da peça em usinagem, conforme mostrado na Figura 21 (Evans, 2007).

Figura 21 – Compensação do comprimento da ferramenta



Fonte: Evans (2007)

Além das funções e comandos já descritos têm-se ainda os comandos para correção do diâmetro da ferramenta (descritos pela letra “D”); comandos para definição do raio de um círculo ou um arco (descritos pelas letras “R” e “C”); para repetição de ciclos ou subprograma (descritos pela letra “L”); e ainda códigos de caracteres especiais para definir início ou término do programa “%”, escrever comentários “( )”, excluir bloco “/” e definir o fim do bloco “;”.

### 3.4.2 Programação em sistemas absolutos e incrementais

As trajetórias de ferramenta são descritas por valores numéricos baseados em eixos de um sistema de coordenadas. Existem dois métodos para atribuição de coordenadas em sistemas CNC: coordenadas absolutas e coordenadas incrementais (Souza; Ulbrich, 2013).

Com o sistema de coordenadas absolutas, a origem é o ponto zero do programa atualmente ativo. Todos os valores de coordenadas são relativos a essa origem fixa do sistema de coordenadas. Em sistemas incrementais, toda medição refere-se a uma posição previamente dimensionada (ponto a ponto). Ou seja, a origem do movimento está sempre relacionada com a posição atual da ferramenta.

### 3.4.3 Funções de interpolação

Interpolação, no contexto de Desenho Auxiliado por Computador (CAD), é o processo de construção de uma curva definida parametricamente de forma livre, ou superfície, que passa exatamente por um conjunto de pontos de dados. O interpolador é o dispositivo do comando numérico responsável por calcular os valores intermediários de movimentação entre dois pontos da trajetória, A e B, dividindo a trajetória em  $n$  segmentos. Desta maneira, o interpolador dividirá também a trajetória em  $n$  intervalos de movimentação para cada eixo, individualmente (Lockyer, 2006; Souza; Ulbrich, 2013).

Existem várias funções de interpolação que permitem que as máquinas-ferramentas movam os seus eixos ao longo do caminho descrito pela geometria a ser usinada. Um sistema CNC fornece funções de interpolação linear em avanço rápido (G00), interpolação linear em avanço programado (G1), interpolação circular (G02 e G03) e interpolação *spline* (Suh *et al.*, 2008).

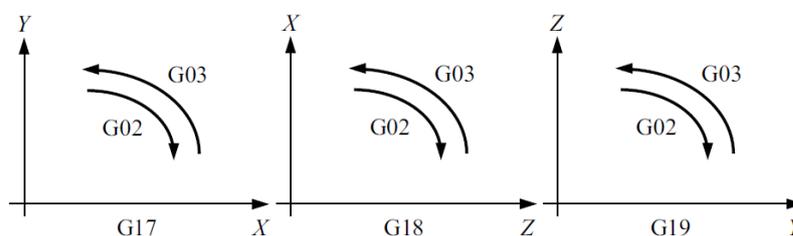
A função de posicionamento rápido ou **interpolação linear em avanço rápido** (G00) é usada para comandar os eixos específicos para se moverem rapidamente para a posição programada. Ela consiste no movimento de velocidade mais rápida que a máquina pode produzir. É aplicada, por exemplo, para reposicionar a ferramenta para outro ponto de corte (numa região em segurança) ou para posicionar a

ferramenta no ponto de troca. As velocidades comuns variam de lentas (na ordem 2,5 m/min) em máquinas de treinamento, a rápidas (na ordem de 25 m/min ou mais) em equipamentos industriais (Fitzpatrick, 2014).

A função de **interpolação linear** (G01) é usada para comandar os eixos para mover a ferramenta ou a mesa da máquina ao longo de uma linha reta com o avanço programado. Quando a máquina CNC é comandada a se mover em interpolação linear, um, dois ou três eixos devem se mover em linha reta e em velocidades coordenadas para chegar ao destino na velocidade de avanço da ferramenta especificada no programa (Fitzpatrick, 2014).

A função de **interpolação circular** (G02 e G03) é usada para comandar o movimento da ferramenta ao longo de um círculo. G02 descreve a interpolação circular no sentido horário e G03 descreve a interpolação circular no sentido anti-horário. A Figura 22 mostra os sentidos de rotação individuais nos casos em que os planos programados são os planos XY (programado pela função G17), ZX (programado pela função G18) e YZ (programado pela função G19) (Suh *et al.*, 2008).

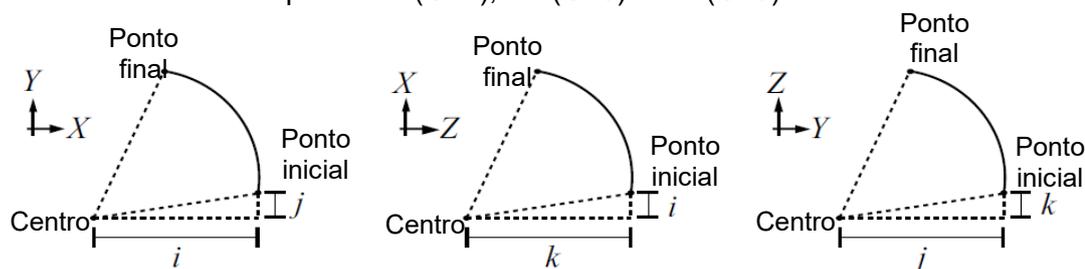
Figura 22 – Direção horária e anti-horária para o plano XY (G17), ZX (G18) e YZ (G19)



Fonte: Suh *et al.* (2008).

O ponto final de um arco é especificado pelas coordenadas X, Y e Z, e é expresso como um valor absoluto ou incremental. O centro do arco pode ser especificado usando o raio "R" ou usando as coordenadas auxiliares I, J e K. Se as coordenadas auxiliares forem usadas, o valor numérico após elas é um componente vetorial no qual o centro do arco é visto do ponto inicial e é sempre especificado como um valor incremental, como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Distância entre o ponto inicial e o centro do arco pelas coordenadas I, J e K no plano XY (G17), ZX (G18) e YZ (G19)

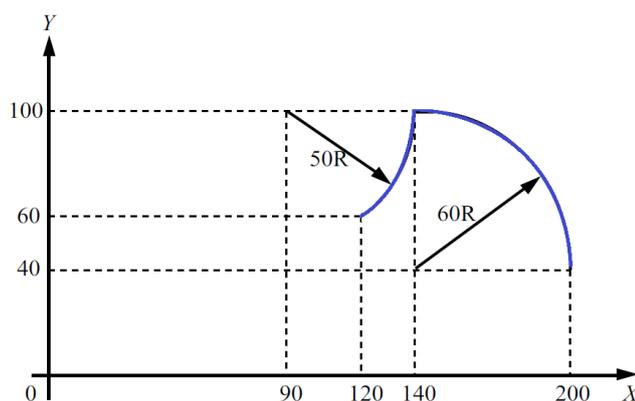


Fonte: adaptado de Suh *et al.* (2008).

A velocidade de avanço na interpolação circular é igual à velocidade de avanço especificada no código “F”, e a velocidade de avanço ao longo do arco (avanço tangencial do arco) é controlada pela velocidade de avanço especificada.

A Figura 24 mostra um exemplo de programação real de interpolação circular no caso do modo G90 e modo G91, respectivamente.

Figura 24 – Interpolação circular absoluta e incremental



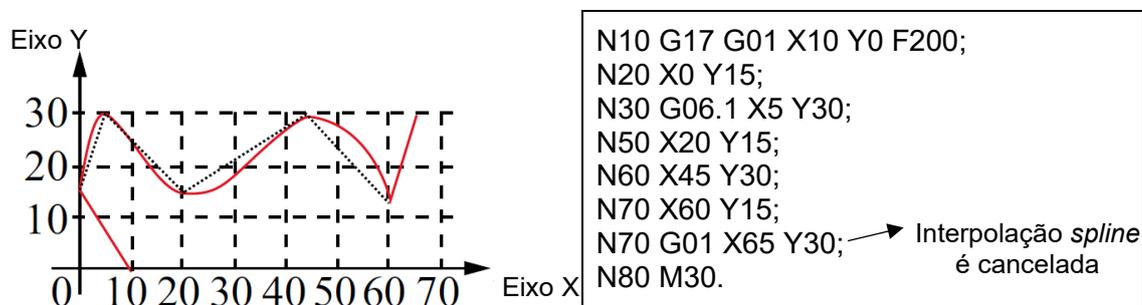
Utilizando coordenadas absolutas e coordenadas I, J e K →	G92 X200 Y40 Z0; G90 G03 X140 Y100 I-60 F300; G02 X120 Y60 I-50;
Utilizando coordenadas absolutas e o raio R →	G92 X200 Y40 Z0; G90 G03 X140 Y100 R60 F300; G02 X120 Y60 R50;
Utilizando coordenadas incrementais e coordenadas I, J e K →	G91 G03 X-60 Y60 I-60 F300; G02 X-20 Y-40 I-50;
Utilizando coordenadas incrementais e o raio R →	G91 G03 X-60 Y60 R60 F300; G02 X-20 Y-40 R50;

Fonte: adaptado de Suh *et al.* (2008)

A **interpolação spline** (G06.1 ou G6.2) é usada para usinar curvas ou superfícies de forma livre e permite que a ferramenta seja movida ao longo da curva interpolada que passa pelos pontos especificados, conforme mostrado na Figura 25.

A interpolação spline é cancelada comandando outro código G (por exemplo, G00, G01, G02, G03) que pertence ao mesmo grupo de código.

Figura 25 – Exemplo de interpolação spline

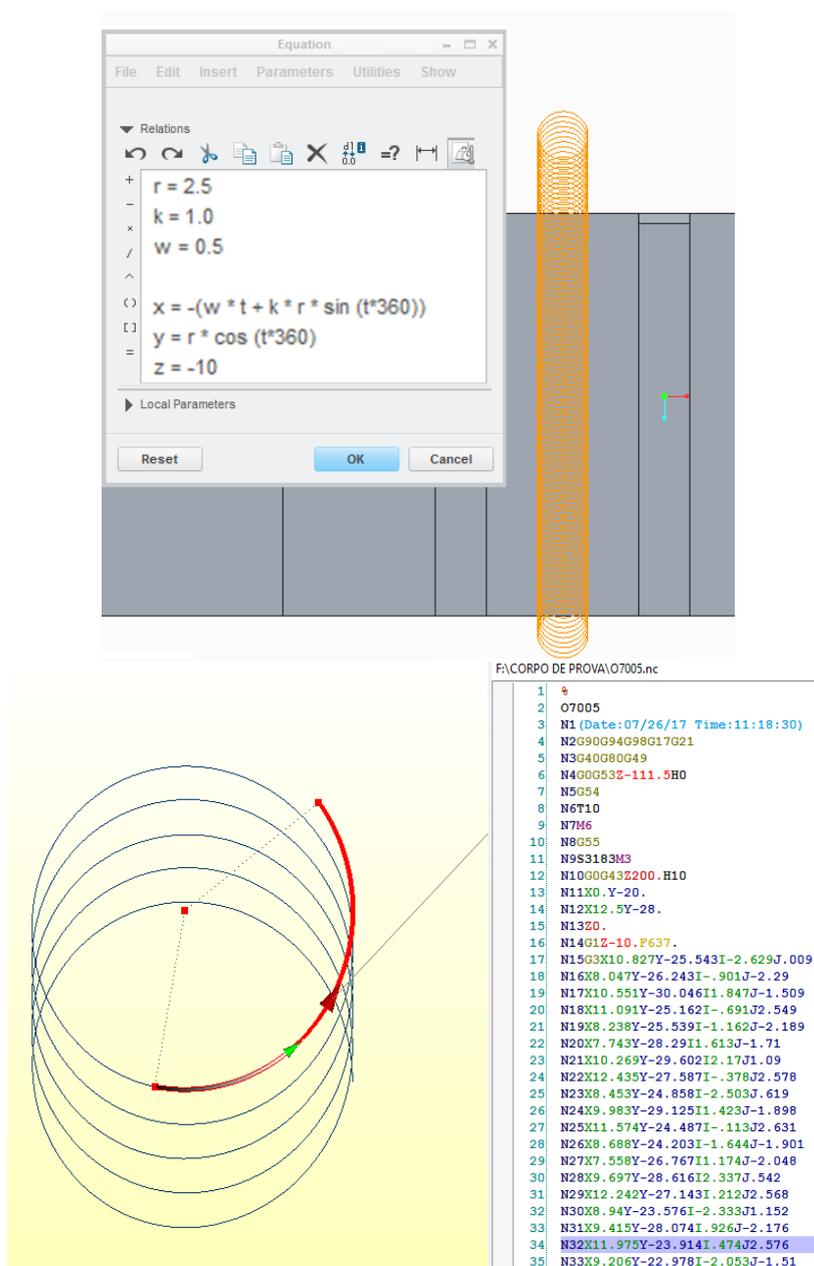


Fonte: adaptado de Suh *et al.* (2008)

#### 3.4.4 Programação de trajetórias trocoidais

A programação de trajetórias trocoidais, geralmente, é realizada a partir da inserção de equações matemáticas (muitas vezes, parametrizadas) em *softwares* que interpretem a curva e a transforme em um conjunto de segmentos lineares e/ou circulares. O uso de um *software* CAM para esse fim, auxilia e agiliza esse processo, como mostrado na Figura 26.

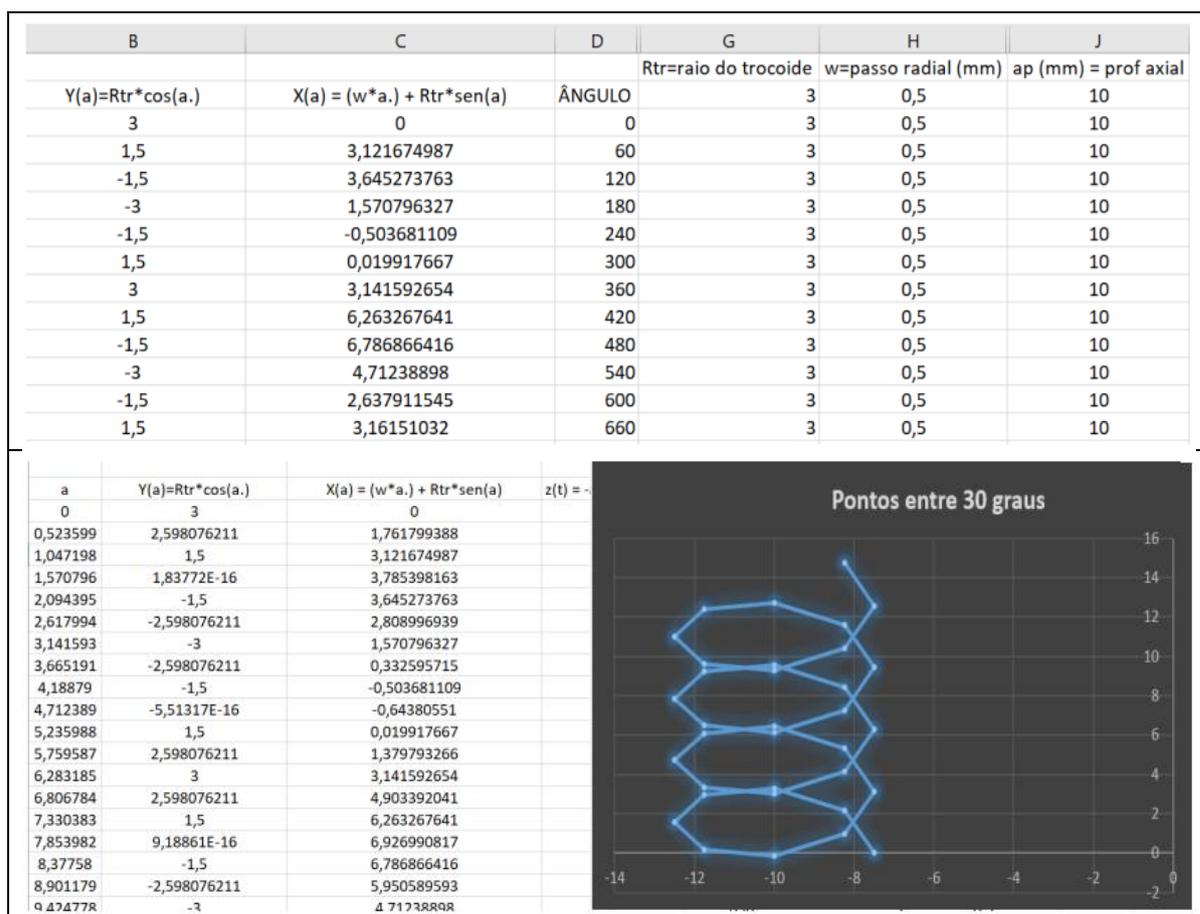
Figura 26 - Caminho trocoidal baseado em eq. paramétricas programado no software CAM



Fonte: Trindade (2018).

Além de *softwares* CAM, é possível utilizar um *software* editor de planilhas (como o Microsoft Excel) para obter as coordenadas dos pontos descritos pela equação paramétrica que define o caminho da ferramenta a realizar o caminho trocoidal, conforme mostrado na Figura 27.

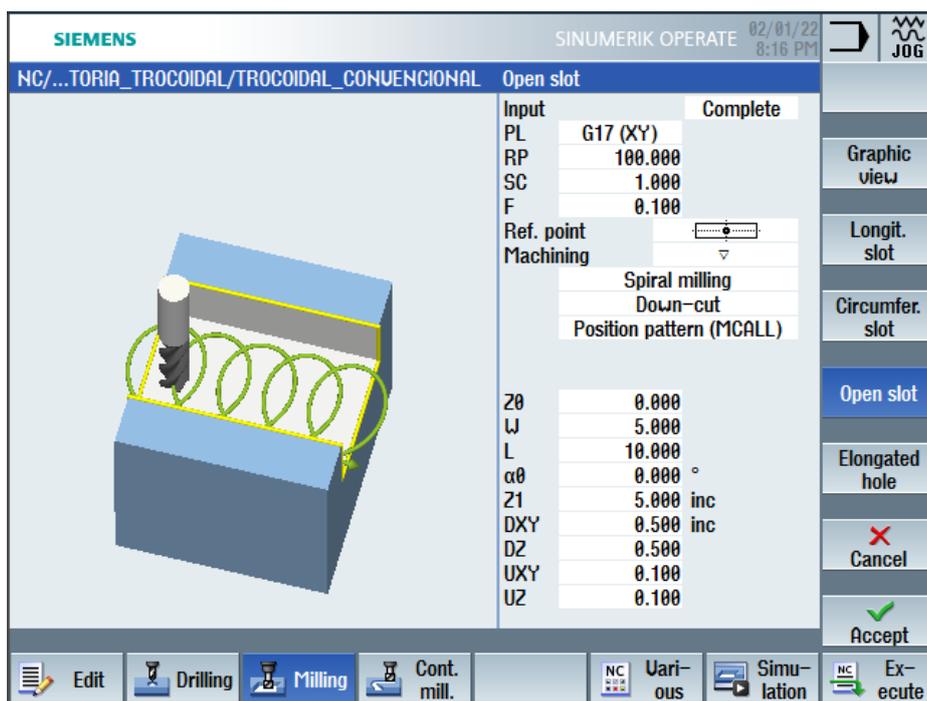
Figura 27 - Caminho trocoidal baseado em eq. paramétricas programado no software Excel



Fonte: Paschoal (2021).

Outra forma de se programar operações de fresamento trocoidal de canais é utilizar as definições predefinidas por alguns *softwares* CAM, geralmente, com possibilidade de programação no próprio painel do controlador da máquina CNC. Esse é o caso do *software* Siemens SinuTrain for Sinumerik Operate 840D SL®, que usa o mesmo *software* CNC do controlador da máquina-ferramenta. Nele, é possível selecionar uma opção de fresamento de canais chamada de *Spiral Milling*, que se assemelha com o fresamento trocoidal (ver Figura 28).

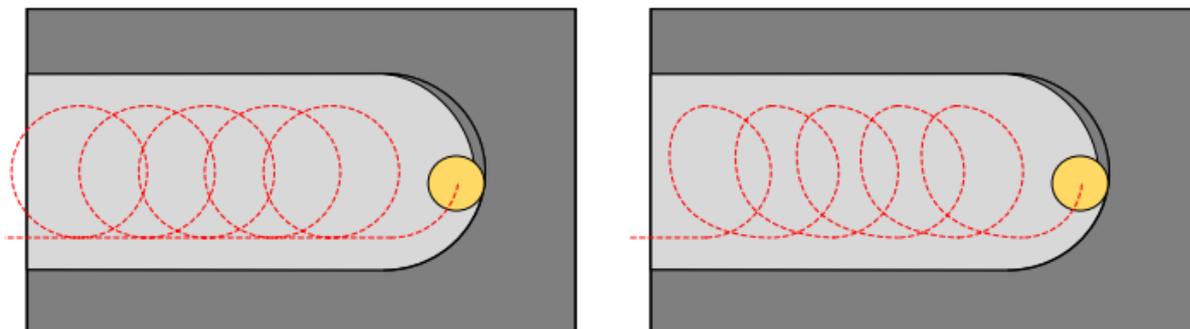
Figura 28 – Programação automática no painel do controlador CNC



Fonte: Autoria própria (2025)

Outro método para programação de trajetórias trocoidais, consiste na escrita puramente manual dos pontos que definem o caminho da ferramenta, a partir da utilização de interpolações circulares e lineares para descrever os arcos e retas da trajetória. Nesse método, é comum observar linhas retas na direção do incremento do passo radial da trajetória ( $P_{\text{troch}}$  - ver Figura 2), conforme pode ser observado na Figura 29. O uso dessas linhas retas pode ser considerado como uma vantagem dessa técnica, uma vez que reduz as marcas de avanço em uma das paredes do canal.

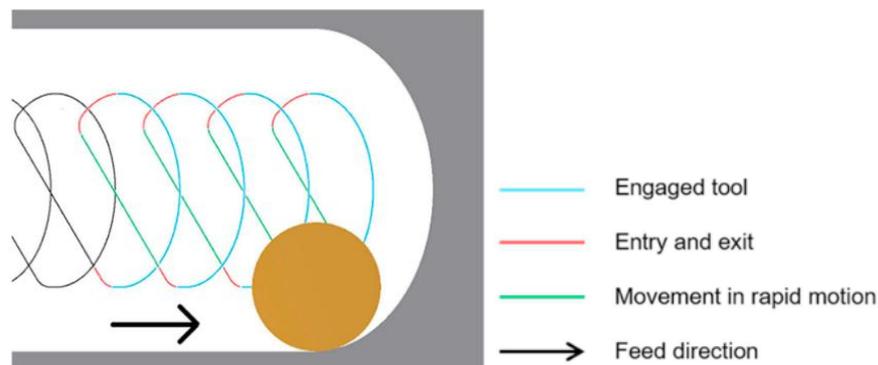
Figura 29 – Caminho trocoidal escrito de forma manual (à esquerda), chamado pelo autor de “trocoidal circular” e de forma matemática (à direita), chamado pelo autor de “trocoidal não circular”.



Fonte: Li *et al.* (2020)

Outra característica do método de programação puramente manual, são as curvas e retas bem definidas na trajetória, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Representação do movimento da ferramenta durante o fresamento trocoidal



Fonte: Uhlmann *et al.* (2020)

Embora o caminho da ferramenta não tenha sido definido matematicamente, como nos métodos mais tradicionais, àqueles utilizados por Otkur e Lazoglu (2007), Ducroux *et al.* (2019), Trindade (2018) e Paschoa (2021), ele ainda define uma trajetória trocoidal de ferramenta.

O método puramente manual não descaracteriza a trajetória trocoidal e tem sido uma alternativa comumente utilizada para a criação de novos caminhos trocoidais aplicados ao fresamento, como observado no trabalho de Uhlmann *et al.* (2020) e Waszczuk (2020).

Diante disso, esse método foi utilizado para a escrita das trajetórias estudadas nesse trabalho.

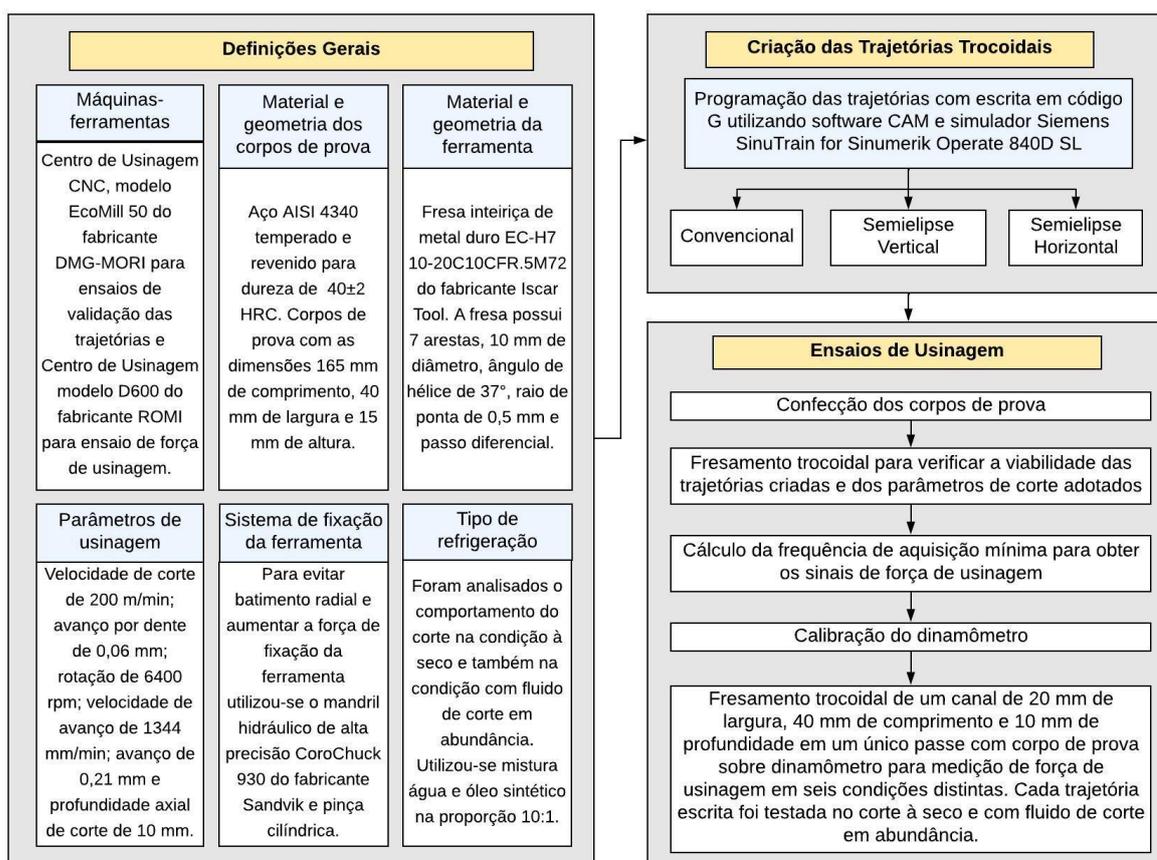
## 4 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão descritos os equipamentos, materiais e procedimentos experimentais adotados para realização desse trabalho. Inicialmente, será apresentado um fluxograma detalhando de forma resumida as etapas de execução adotadas. Posteriormente, serão apresentados os equipamentos e materiais utilizados na realização dos experimentos. Ao final do capítulo, será descrito o planejamento experimental adotado.

### 4.1 FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO

Com o intuito de facilitar o entendimento das etapas desenvolvidas nesse trabalho, criou-se o fluxograma mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma de Execução



Fonte: Autoria própria (2025)

O estudo foi conduzido em três etapas: definição dos parâmetros experimentais, elaboração das trajetórias e execução dos ensaios de usinagem.

Os experimentos desta pesquisa foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) localizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e no Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP).

## 4.2 DEFINIÇÕES GERAIS

Os testes de usinagem foram projetados para avaliar e comparar o desempenho de três trajetórias trocoidais diferentes — convencional, semielíptica horizontal e semielíptica vertical — em termos de tempo de usinagem e força de usinagem. Esses testes foram realizados sob duas condições distintas de corte: usinagem a seco e aplicação abundante de fluido de corte. O objetivo foi identificar a trajetória e as condições ótimas para o fresamento de canais profundos em aço AISI 4340 temperado e revenido, um material conhecido por suas altas resistências mecânica e térmica.

### 4.2.1 Máquinas-ferramentas

Os ensaios de fresamento trocoidal para verificar a viabilidade das trajetórias criadas dos parâmetros de corte adotados foram conduzidos em um centro de usinagem CNC de 5 eixos posicionados, modelo EcoMill 50, da fabricante DMG-MORI, equipado com comando numérico Siemens Sinumerik 840D sl. Já os ensaios de medição das componentes da força de usinagem foram realizados em um centro de usinagem CNC de 3 eixos, modelo D600, da fabricante ROMI, dotado de comando numérico Fanuc 0i-MF Plus i-HMI.

### 4.2.2 Material e geometria dos corpos de prova

O material utilizado nos ensaios foi o aço AISI 4340, submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento até atingir dureza de  $40 \pm 2$  HRC, valor típico de aços endurecidos aplicados em componentes de alto desempenho. A escolha desse material se deve à sua baixa usinabilidade — resultante da elevada dureza — e à sua

ampla aplicação na fabricação de moldes, matrizes, componentes automotivos e equipamentos industriais.

Todos os corpos de prova foram obtidos a partir de um único bloco de aço, fornecido pela empresa Gerdau Comercial de Aço S/A (lote 8865314). A Tabela 3 apresenta a composição química do material.

Tabela 3 – Composição química do aço AISI 4340

Elemento (% em massa)										
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>
0,39	0,24	0,74	0,019	0,020	0,76	1,70	0,018	0,06	0,007	0,0025
<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>B</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>Co</b>	<b>Ca</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Zr</b>	
0,005	0,004	0,0003	0,003	0,001	0,029	0,0006	0,001	0,003	0,001	

Fonte: Certificado de Qualidade do Fornecedor (2012)

Três tipos de corpos de prova foram preparados, de acordo com a finalidade dos ensaios:

**a) Corpos de prova para ensaios de viabilidade técnica das trajetórias trocoidais e dos parâmetros de corte**

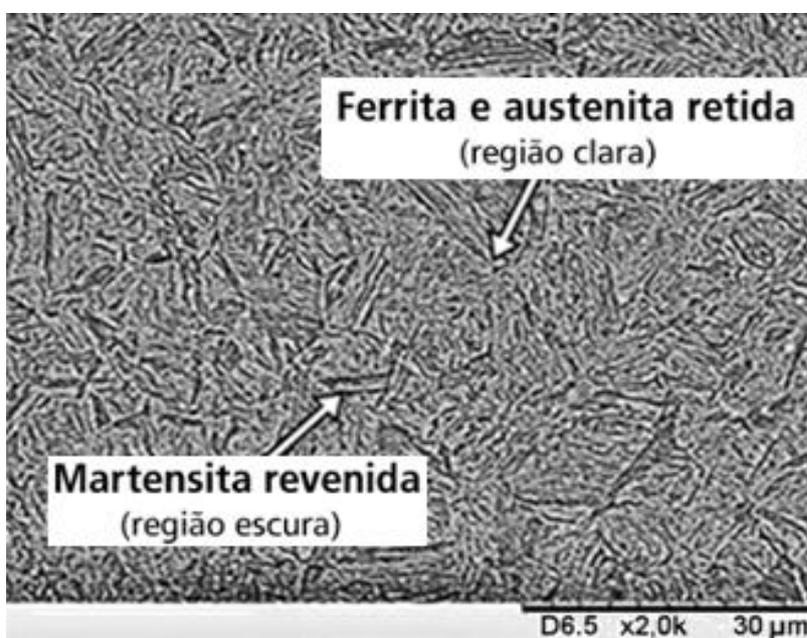
Foram utilizados dois formatos de corpos de prova: o primeiro, com dimensões de 200 × 100 × 40 mm, destinado à avaliação da viabilidade de diferentes combinações de parâmetros de corte na usinagem trocoidal de canais com 100 mm de comprimento. O segundo, com dimensões reduzidas de 20 × 25 × 30 mm, teve como objetivo a verificação preliminar de possíveis efeitos metalúrgicos, como deformações nas paredes do canal e formação de camada branca. Apesar da realização de metalografia nessas amostras, não foram identificadas alterações microestruturais relevantes, motivo pelo qual os resultados desses ensaios não foram incluídos neste trabalho, uma vez que não contribuíram com evidências significativas para os objetivos principais da pesquisa.

O tratamento térmico de têmpera dos corpos de prova com dimensões reduzidas foi realizado em forno da marca INNOVATEC (controlador COEL), sob atmosfera controlada de argônio, a 870 °C por 1 hora — tempo definido em função das dimensões do material. Antes da injeção do gás, utilizou-se uma bomba de vácuo de duplo estágio (EOS Ferramentas, modelo VE245ND) para remoção do ar. O

argônio foi injetado com vazão de 10 L/min. Após o tempo de permanência no forno, os corpos de prova foram imediatamente resfriados em banho de óleo mineral com aditivos (LUBRAX Hidra 68, ANP 06379). Para garantir a segurança durante a operação, foram utilizadas pinça e peneira metálicas. O revenimento foi realizado em um segundo forno (EDG Equipamentos e Controles Ltda, modelo W-One). Os corpos de prova foram inseridos em forno pré-aquecido a 400 °C e mantidos por 45 minutos. Em seguida, o forno foi desligado e o material resfriado rapidamente, com o objetivo de evitar a permanência prolongada na faixa crítica de fragilização.

Após os tratamentos térmicos, todos os corpos de prova foram submetidos a ensaio de dureza Rockwell, confirmando que os valores obtidos estavam dentro da faixa especificada ( $40 \pm 2$  HRC). Adicionalmente, foi realizada análise microestrutural em uma das amostras, revelando a presença de martensita revenida (regiões escuras), ferrita e austenita retida (regiões claras), conforme ilustrado na Figura 32. A presença dessas fases está de acordo com os tratamentos térmicos aplicados e valida a condição metalúrgica dos corpos de prova.

Figura 32 – Microestrutura do aço AISI 4340 endurecido

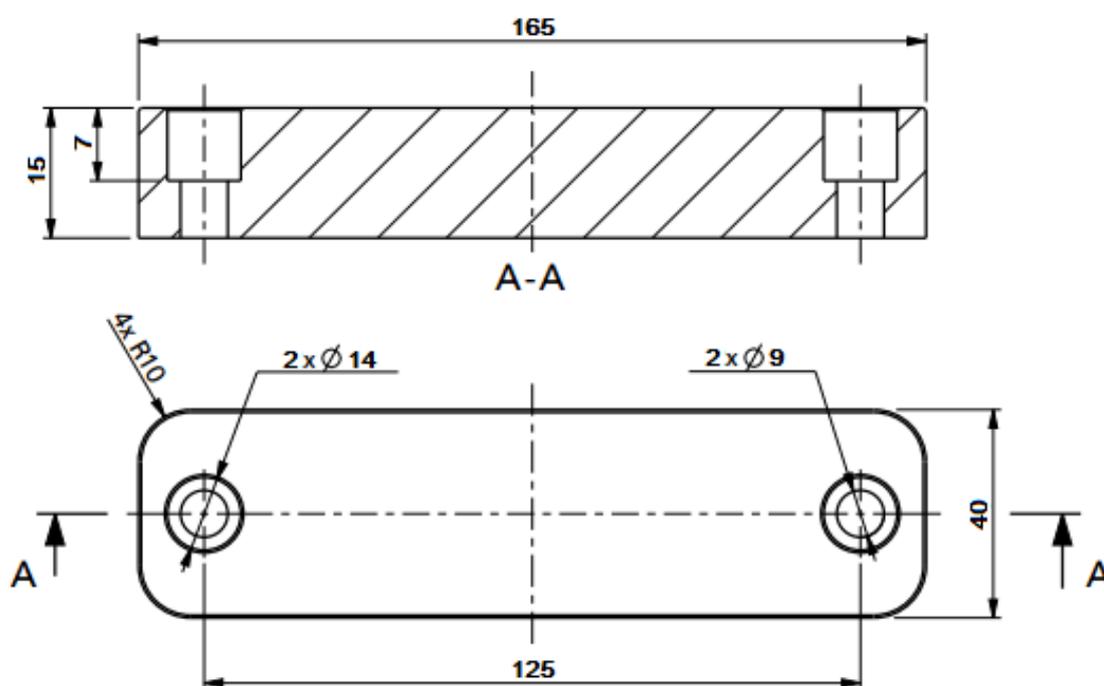


Fonte: Autoria própria (2025)

### b) Corpos de prova para ensaios de força de usinagem

Os corpos de prova destinados aos ensaios de força e tempo de usinagem possuíam dimensões de 165 × 40 × 15 mm, conforme ilustrado na Figura 33. Foram usinados furos com rebaixos nas extremidades para permitir a fixação segura ao dinamômetro. A geometria foi projetada de modo a permitir a usinagem de até quatro canais por peça, garantindo maior aproveitamento do material. O tratamento térmico desses corpos, assim como dos corpos de prova com dimensões de 200 × 100 × 40 mm, foi realizado por uma empresa parceira, utilizando parâmetros industriais padronizados para a obtenção de dureza de  $40 \pm 2$  HRC.

Figura 33 – Geometria do corpo de prova



Nota: Chanfros não cotados 0.5x45°

Fonte: Autoria própria (2025)

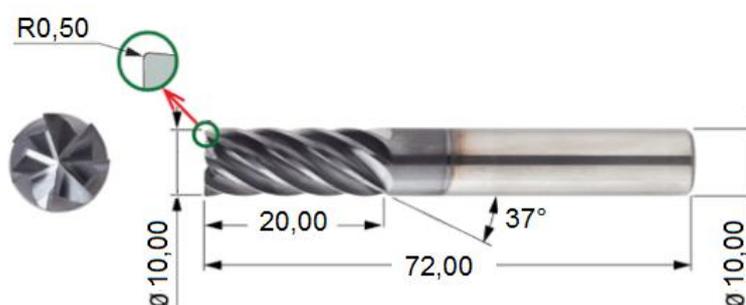
#### 4.2.3 Material e geometria da ferramenta de corte

As ferramentas de corte utilizadas nos experimentos foram fresas inteiriças de metal duro EC-H7 10-20C10CFR.5M72, fornecidas pela Iscar Tool. Cada fresa (Figura 34) possui sete arestas de corte, diâmetro de 10 mm, ângulo de hélice de 37°, raio de ponta de 0,5 mm e passo diferencial.

A escolha dessa ferramenta se deve à recomendação do fabricante para operações de fresamento trocoidal, devido à sua geometria otimizada para esse tipo de usinagem. Além disso, uma fresa da mesma família (EC-H7) foi empregada por Waszczuk et al. (2019) no fresamento trocoidal do aço DIN 145Cr6, com dureza de  $58 \pm 2$  HRC, apresentando resultados satisfatórios em termos de desempenho e estabilidade. Essa configuração, incluindo o raio de ponta de 0,5 mm e o *design* com passo diferencial, foi selecionada estrategicamente para maximizar a eficiência da operação, garantir altas taxas de remoção de material e prolongar a vida útil da ferramenta. Segundo Sandvik Coromant (2025), o passo diferencial — caracterizado pelo espaçamento desigual entre os dentes ao longo do perímetro da fresa — contribui para a quebra de vibrações harmônicas, promovendo maior estabilidade durante o corte e reduzindo significativamente o risco de vibrações indesejadas.

Para a realização dos ensaios experimentais, foram adquiridas 14 unidades da ferramenta, com recursos próprios e apoio de financiamento para pesquisa.

Figura 34 – Desenho 2D da ferramenta utilizada nos experimentos



Fonte: adaptado de Iscar Tool (2021)

A fresa utilizada neste estudo é fabricada com grão de metal duro ultrafino contendo 9% de cobalto e possui revestimento de TiAlN aplicado por deposição física de vapor (PVD). Essa combinação confere à ferramenta alta resistência ao desgaste abrasivo, o que, segundo o fabricante, a torna adequada para usinagem em alta velocidade de diversos materiais, como aços endurecidos e ferros fundidos.

Na Tabela 4 são apresentadas as velocidades de corte recomendadas para o fresamento de diferentes tipos de aço com essa ferramenta. Para o aço AISI 4340 temperado e revenido, com dureza de  $40 \pm 2$  HRC ( $\approx 375$  HB, classe ISO P8), selecionou-se uma velocidade de corte de 200 m/min, valor compatível com a faixa recomendada pelo fabricante para materiais com características semelhantes.

Tabela 4 – Velocidade de corte para a ferramenta EC-H7 10-20C10CFR.5M72

ISO	Material	Designação de Material	Condição Material	Dureza	Recomendações de velocidade de corte (Vc)
P	6	Baixa liga e aço fundido (menos de 5% dos elementos de liga)	Recozido	200 HB	<b>160-240 m / min</b>
P	7	Baixa liga e aço fundido (menos de 5% dos elementos de liga)	Temperado e revenido	275 HB	<b>120-200 m / min</b>
P	8	Baixa liga e aço fundido (menos de 5% dos elementos de liga)	Temperado e revenido	300 HB	<b>130-200 m / min</b>
P	9	Baixa liga e aço fundido (menos de 5% dos elementos de liga)	Temperado e revenido	350 HB	<b>140-200 m / min</b>
P	10	Aço de alta liga, aço fundido e aço ferramenta	Recozido	200 HB	<b>130-200 m / min</b>
P	11	Aço de alta liga, aço fundido e aço ferramenta	Temperado e revenido	325 HB	<b>70-130 m / min</b>
H	38	Aço endurecido	Endurecido	55 HRC	<b>30-65 m / min</b>
H	39	Aço endurecido	Endurecido	60 HRC	<b>30-45 m / min</b>

Fonte: adaptado de Iscar Tool (2021)

Para o sistema de fixação da ferramenta (Figura 35), foi selecionado um mandril hidráulico de alta precisão para usinagem pesada (CoroChuck 930 HD, do fabricante Sandvik), visando garantir estabilidade e minimizar o desvio radial durante os experimentos. Este dispositivo de fixação de alta precisão, desenvolvido com um mecanismo cilíndrico de *clamping*, assegurou força de fixação superior e desempenho aprimorado no amortecimento de vibrações, otimizando as condições de usinagem.

Figura 35 – Fixação da ferramenta de corte



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.2.4 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de corte foram definidos, calculados e padronizados com base em estudos preliminares de usinagem, em diretrizes consolidadas para a usinagem de aços endurecidos, nas recomendações dos fabricantes de ferramentas e nas equações apresentadas na Figura 15, que tratam dos parâmetros ideais para o fresamento trocoidal.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros adotados.

Tabela 5 – Parâmetros de corte adotados para os ensaios de usinagem

Parâmetros de corte	
Tipo de corte	Concordante
Condição de Refrigeração	A seco Emulsão em abundância
Diâmetro da fresa ( $D_c$ )	10 mm
Diâmetro do trocoide ( $D_{vf}$ )	10 mm
Largura do canal ( $D_m$ )	20 mm
Avanço por dente ( $f_z$ )	0,06 mm
Profundidade de usinagem radial ( $a_e$ ) máximo	0,5 mm
Profundidade de usinagem axial ( $a_p$ )	10 mm
Passo da trajetória ( $\omega$ )	0,5 mm
Número de arestas de corte ( $z_n$ )	7
Velocidade de corte ( $v_c$ )	200 m/min
Rotação ( $n$ )	6400 rpm
Velocidade de avanço periférica ( $V_{fm}$ )	2688 mm/min
Velocidade de avanço central da ferramenta ( $V_f$ )	1344 mm/min

Fonte: Autoria própria (2025)

Os valores adotados foram definidos com o objetivo de equilibrar o desempenho da usinagem com a preservação da integridade da ferramenta. A fresa utilizada possuía diâmetro de 10 mm, mesma dimensão do diâmetro do trocoide ( $D_{vf}$ ), enquanto a largura do canal usinado ( $D_m$ ) foi de 20 mm. Considerando um avanço por dente de 0,06 mm, sete arestas de corte e uma rotação de 6400 rpm, obteve-se uma velocidade de avanço periférica ( $V_{fm}$ ) de 2688 mm/min (ver equação 5). No entanto, na programação em G-code, o valor inserido na função F corresponde à velocidade de avanço do ponto central da ferramenta ( $V_f$ ), calculada em 1344 mm/min com base na razão geométrica entre o diâmetro da fresa e a largura do canal (ver Equação 6). Isso ocorre porque, em trajetórias trocoidais, a movimentação helicoidal da ferramenta faz com que a aresta de corte percorra uma distância maior do que o centro da ferramenta, resultando em uma velocidade periférica superior à velocidade central.

$$v_{fm} = n \cdot f_z \cdot z = 6400 \cdot 0,06 \cdot 7 = 2688 \text{ mm/min} \quad (5)$$

$$v_f = \frac{D_m - D_c}{D_m} \cdot v_{fm} = \frac{20 - 10}{20} \cdot 2688 = 1344 \text{ mm/min} \quad (6)$$

A definição da profundidade de usinagem radial ( $a_e$ ) em fresamento trocoidal segue critérios técnicos baseados principalmente em proporções do diâmetro da ferramenta, geometria do canal e características do material usinado. Uma prática comum é considerar o  $a_e$  como uma fração do diâmetro da fresa ( $D_c$ ), variando geralmente entre 5% e 25% de  $D_c$ . No caso de materiais de alta dureza, como o aço AISI 4340 temperado e revenido ( $\approx 40 \pm 2$  HRC), recomenda-se a utilização de valores mais conservadores, geralmente entre 5% e 15%, com o intuito de reduzir os esforços radiais, limitar o desgaste da ferramenta e evitar deflexões excessivas (Sandvik Coromant, 2025).

Neste estudo, foi adotado um  $a_e$  de 0,5 mm com uma fresa de 10 mm de diâmetro, o que corresponde exatamente a 5% de  $D_c$ . Esse valor representa o limite inferior da faixa recomendada para materiais de difícil usinagem, sendo estrategicamente escolhido para preservar a integridade da ferramenta e assegurar estabilidade ao processo, especialmente sob condições de corte exigentes como a usinagem a seco.

A profundidade de usinagem axial ( $a_p$ ) foi definida em 10 mm, valor equivalente ao diâmetro da fresa utilizada. Essa escolha está de acordo com práticas consolidadas em fresamento trocoidal, onde é comum utilizar  $a_p$  igual ou próximo ao diâmetro da ferramenta, aproveitando o perfil de esforço distribuído da trajetória trocoidal, que permite cortes profundos com menor carga radial. Dessa forma, a combinação de  $a_e$  reduzido e  $a_p$  elevado proporciona alta taxa de remoção de material com segurança e maior vida útil da ferramenta, mesmo em operações a seco ou com refrigeração mínima.

A definição do avanço por dente ( $f_z = 0,06$  mm/rot) neste estudo foi fundamentada em considerações relacionadas à capacidade máxima do dinamômetro, bem como à pressão específica de corte do material e à profundidade de usinagem axial adotada. Para embasar essa escolha, foi realizado um ensaio exploratório de usinagem em canal cheio, utilizando uma fresa de metal duro com

diâmetro de 10 mm e ângulo de hélice de 10° (Sandvik, código R216.24-10050EAK22H 1010). Nesse ensaio, a velocidade de corte foi mantida constante em 200 m/min, com profundidade de corte axial ( $a_p$ ) de 0,5 mm e rotação de 6400 rpm.

Foram testados diferentes valores de avanço por dente: 0,02; 0,03; 0,05; 0,07; 0,10; 0,14; 0,19; 0,25 e 0,30 mm/rot, registrando-se a força de usinagem correspondente para cada condição. A partir dos resultados obtidos, foi possível estimar a pressão específica de corte do aço constituinte dos corpos de prova desse trabalho (o aço AISI 4340 endurecido para 40 HRC). Com isso, pôde-se selecionar um avanço por dente que garantisse que a força de usinagem ficasse dentro dos limites operacionais do dinamômetro, assegurando tanto a integridade do sistema de medição quanto a representatividade dos dados coletados. O valor de 0,06 mm/dente foi, portanto, escolhido por oferecer um equilíbrio entre esforço de corte, estabilidade da operação e precisão na aquisição dos dados.

#### 4.3 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios de fresamento trocoidal foram realizados em um canal reto com dimensões de 20 mm de largura, 40 mm de comprimento e 10 mm de profundidade. As trajetórias adotadas — circular (convencional), semielíptica horizontal e semielíptica vertical — foram programadas por meio de códigos G gerados em *software* CAM e posteriormente simuladas no ambiente Siemens SinuTrain, para o sistema CNC Sinumerik Operate 840D SL.

Cada trajetória foi executada em operação de passe único, assegurando uma base comparativa consistente entre as diferentes estratégias. Todos os ensaios foram conduzidos com corte concordante, condição na qual a espessura do cavaco se inicia maior e vai gradualmente diminuindo até zero ao final do corte, favorecendo a estabilidade do processo.

As condições de refrigeração utilizadas incluíram corte a seco e usinagem com emulsão abundante. Para esta última, foi utilizado um óleo emulsionável miscível em água (Blasocut BC 40 NF, da Blaser), na proporção 10:1 (água:óleo). A Tabela 6 apresenta o detalhamento das combinações entre as trajetórias e as condições de refrigeração testadas.

Tabela 6 – Estratégias de trajetória trocoidal e respectivas condições de refrigeração adotadas nos ensaios

Trajecória Trocoidal	Condições de Refrigeração	Ensaio
Circular (convencional)	A seco	C Seco
	Emulsão em abundância	C Fluido
Semielíptica horizontal	A seco	SH Seco
	Emulsão em abundância	SH Fluido
Semielíptica vertical	A seco	SV Seco
	Emulsão em abundância	SV Fluido

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a medição do tempo de usinagem, foi adotado como ponto de referência o momento em que a ferramenta engaja no material durante o segundo trocoide da trajetória. Essa escolha visa eliminar possíveis inconsistências relacionadas ao deslocamento inicial da ferramenta e ao seu posicionamento.

Além disso, o número total de trocoides foi ajustado individualmente para cada trajetória, de forma a garantir a cobertura completa dos 40 mm do canal. Com o objetivo de assegurar a usinagem integral da região-alvo e promover melhor uniformidade no acabamento superficial, um trocoide extra foi adicionado ao final de cada trajetória como medida de segurança.

#### 4.3.1 Aquisição e Calibração da Força de Usinagem

As componentes da força de usinagem foram obtidas por meio de um dinamômetro multicomponente (modelo 9257BA), associado a um amplificador de carga (modelo 5233A1), cabo de conexão e sistema de aquisição de dados (DAQ), todos da fabricante Kistler. O sistema foi devidamente calibrado antes dos ensaios, assegurando a confiabilidade das medições. A Figura 36 apresenta uma cena do processo de fresamento trocoidal com aplicação abundante de fluido de corte, destacando os sentidos positivos das componentes de força nos eixos X, Y e Z.

Figura 36 - Processo de fresamento com indicação das direções das componentes de força medidas pelo dinamômetro



Fonte: Autoria própria (2025)

A calibração do dinamômetro foi realizada previamente aos ensaios de usinagem com o objetivo de validar a exatidão na leitura das forças nas direções  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ . Para isso, massas conhecidas foram aplicadas individualmente sobre o dinamômetro, gerando forças gravitacionais controladas cujos valores foram calculados. A Tabela 7 apresenta os valores de massa utilizados, os respectivos pesos convertidos em newtons, os sinais registrados pelo dinamômetro em cada eixo e os erros percentuais obtidos em relação ao valor teórico da força aplicada.

Tabela 7 – Dados da calibração do dinamômetro e erros percentuais nas medições

Massa (kg)	Peso (N)	$F_x$ (N)	Erro Abs $F_x$	Erro % $F_x$	$F_y$ (N)	Erro Abs $F_y$	Erro % $F_y$	$F_z$ (N)	Erro Abs $F_z$	Erro % $F_z$
0,5	4,9	5	0,1	2.04%	4,98	0,08	1.63%	-	-	-
1	9,81	10	0,19	1.94%	-	-	-	10	0,19	1.94%
2	19,62	20	0,38	1.94%	-	-	-	20	0,38	1.94%
2	19,62	-	-	-	20	0,38	1.94%	-	-	-
3	29,43	-	-	-	30	0,57	1.94%	30	0,57	1.94%

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados demonstram boa linearidade entre as forças aplicadas e os sinais captados, com erros percentuais iguais ou inferiores a 2%, o que indica que o sistema está devidamente calibrado e apto para medições confiáveis. Pequenas variações nos valores podem ser atribuídas a fatores como a sensibilidade do sensor, o posicionamento da massa e possíveis oscilações ambientais durante a medição. Para verificar a consistência dos resultados desse trabalho, os ensaios de medição de força de usinagem das trajetórias trocoidais foram repetidos sob condições idênticas, permitindo a validação cruzada dos dados.

A definição da frequência de amostragem no presente experimento leva em consideração o Teorema de Nyquist-Shannon, o qual estabelece que, para garantir a reconstrução adequada de um sinal contínuo, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal. No contexto da usinagem analisada, a frequência fundamental do sinal de força é diretamente relacionada à frequência de rotação da ferramenta e ao número de arestas de corte.

A rotação da ferramenta é de 6400 rpm (rotações por minuto). Convertendo para Hz (ciclos por segundo) tem-se o valor de 106,67 Hz. Como a ferramenta possui 7 arestas de corte, cada rotação completa gera 7 impactos (ou picos de força), logo a frequência total de excitação é de 746,67 Hz (ver eq. 7).

$$f_{excitação} = 106,67 \text{ Hz} \cdot 7 = 746,67 \text{ Hz} \quad (7)$$

Assim, a aplicação direta do teorema indicaria uma frequência mínima de amostragem de cerca de 1493,34 Hz.

Entretanto, a escolha da frequência de amostragem neste estudo vai além do critério mínimo de Nyquist. Isso ocorre porque o objetivo não é apenas detectar a presença das forças geradas durante o corte, mas também capturar detalhes da forma do sinal, variações ao longo do engajamento da aresta, e realizar análises baseadas na posição angular da ferramenta. Para isso, foi adotada uma estratégia de amostragem angular, em que se busca coletar quatro pontos de dados por intervalo de engajamento de cada aresta.

Uma circunferência tem 360° e as 7 arestas são igualmente espaçadas, então o espaçamento angular entre as arestas é de aproximadamente 51,43°. Deseja-se

capturar 4 pontos de dados para cada engajamento de aresta, portanto, o intervalo angular por ponto de dado é de  $12,86^\circ$ , conforme mostrado na eq. 8.

$$\theta_{ponto} = \frac{51,43^\circ}{4} \approx 12,86^\circ \quad (8)$$

Para que o sistema capture um ponto a cada  $12,86^\circ$  de rotação, e sabendo que  $360^\circ$  ocorrem a cada  $746,67$  Hz, a frequência de aquisição necessária é  $20900$  Hz (ver eq. 9).

$$f_{amostragem} = 746,67 \text{ Hz} \cdot \frac{360^\circ}{12,86^\circ} \approx 20900 \text{ Hz} \quad (9)$$

Portanto, com base nos critérios estabelecidos e nas limitações do sistema de aquisição de dados (DAQ) da Kistler, os sinais de força foram adquiridos a uma frequência de  $20.000$  Hz. Tal frequência não apenas atende ao requisito mínimo definido pelo Teorema de Nyquist-Shannon, como também proporciona uma resolução angular suficientemente elevada para permitir análises refinadas do sinal de força. Essa abordagem garante a captura precisa do comportamento dinâmico da interação entre a ferramenta e o material ao longo de cada ciclo de corte.

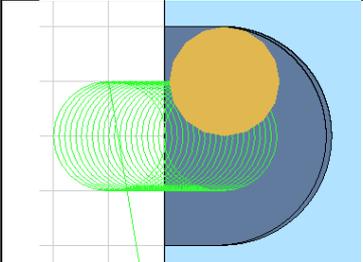
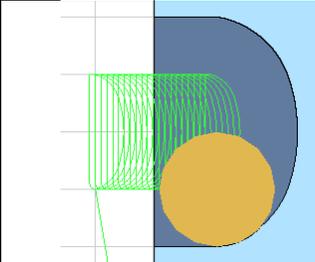
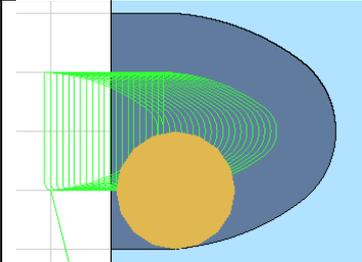
A sensibilidade adotada no amplificador de carga foi de  $2,5$  mV/N, correspondente a uma escala de medição de até  $2$  kN. Essa configuração permite a conversão direta dos sinais elétricos em valores de força, por meio da relação de  $1$  N para cada  $2,5$  mV registrados. Dessa forma, os dados brutos obtidos em volts foram convertidos em Newtons para análise, assegurando a coerência entre os sinais adquiridos e as forças mecânicas efetivamente aplicadas durante os testes de usinagem trocoidal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS TROCOIDAIS

As estratégias de usinagem baseadas em trajetórias trocoidais vêm sendo amplamente utilizadas para operações de desbaste em cavidades fechadas, principalmente por favorecerem o controle do esforço de corte e a dissipação de calor. Este estudo apresenta uma análise comparativa entre três diferentes padrões de programação NC para trajetórias trocoidais: convencional, semielíptica horizontal e semielíptica vertical, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Trajetórias trocoidais e seus códigos

Trajetoária trocoidal convencional	Trajetoária semielíptica horizontal	Trajetoária semielíptica vertical
		
O3007 G54G90G94G17G40 #101=0 #102=103  G0Z100 S6400M3 G1X-10.5Y0F3000 G1Z10F1000 G1Z-10F250 F1344  WHILE[#101LT#102]DO1 G91G3X0Y-10R5 G3X0.5Y10R5 #101=#101+1 END1  M01 G1Z10 G1Z200F3000	O3008 G54G90G94G17G40 #101=0 #102=98  G0Z100 S6400M3 G1X-14Y0F3000 G1Z10F1000 G1Z-10F250 F1344  WHILE[#101LT#102]DO1 G91G3X2Y2R3 G3X0Y6R10 G3X-2Y2R3 G1X-0.5Y0 G1X0Y-9.5 G3X0.5Y-0.5R0.5 G1X0.5Y0 #101=#101+1 END1  M01 G1Z10 G1Z200F3000	O3009 G54G90G94G17G40 #101=0 #102=109  G0Z100 S6400M3 G1X-7.5Y0F3000 G1Z10F1000 G1Z-10F250 F1344  WHILE[#101LT#102]DO1 G91G3X8Y3R15 G3X0Y4R2.5 G3X-8Y3R15 G1X-0.5Y0 G1X0Y-9.5 G3X0.5Y-0.5R0.5 G1X0.5Y0 #101=#101+1 END1  M01 G1Z10 G1Z200F3000

Fonte: Autoria própria (2025)

As trajetórias foram geradas manualmente por meio da escrita direta de código NC, utilizando interpolações circular e linear combinadas ao comando WHILE. A interpolação circular foi adotada estrategicamente por permitir trajetórias contínuas com menos blocos de código, reduzindo a carga de processamento do CNC e evitando oscilações na velocidade de avanço real — comuns em programas com predominância de interpolação linear. O uso do comando WHILE complementa essa abordagem ao permitir a repetição cíclica das trajetórias com economia de linhas de código, contribuindo para um programa CNC mais compacto e eficiente.

Segundo Souza e Ulbrich (2013, p. 222), a eficiência de um programa CNC depende da capacidade de processar e transmitir comandos com rapidez suficiente para acompanhar o movimento da ferramenta:

O tempo necessário para o CNC interpretar uma linha de comando, adicionado ao tempo necessário para as informações de acionamento chegarem aos servomotores, deve ser menor que o utilizado pela ferramenta de corte para percorrer o incremento de trajetória descrito por um bloco de comando. Caso contrário, a máquina atinge o ponto destino e a informação para a movimentação subsequente ainda não está disponível para execução. Neste caso, os CNC mais modernos reduzem automaticamente a velocidade de avanço programada para uma velocidade de avanço compatível com sua velocidade de processamento e atualização dos servos. Isto implica em maior tempo de usinagem devido à incapacidade do sistema de acionamento da máquina (incluindo a capacidade do CNC) em manipular as informações do programa CNC em tempo hábil.

Esse fenômeno torna-se particularmente relevante na usinagem de geometrias complexas com elevada segmentação de trajetória, como aquelas geradas por interpolação linear, devido ao grande volume de blocos produzidos. As trajetórias trocoidais pré-definidas, disponíveis na maioria dos *softwares* CAM, são formadas por segmentos retilíneos de pequeno comprimento conectados por interpolação linear, o que resulta em programas CNC excessivamente extensos. Esse elevado número de blocos compromete a manutenção da velocidade de avanço programada, ocasionando discrepâncias entre a velocidade real e a desejada durante a usinagem. Essa limitação reforça a relevância das estratégias propostas neste estudo, que visam não apenas à otimização da trajetória, mas também à redução da carga de processamento e à preservação da eficiência dinâmica do sistema CNC.

### 5.1.1 Análise do código NC

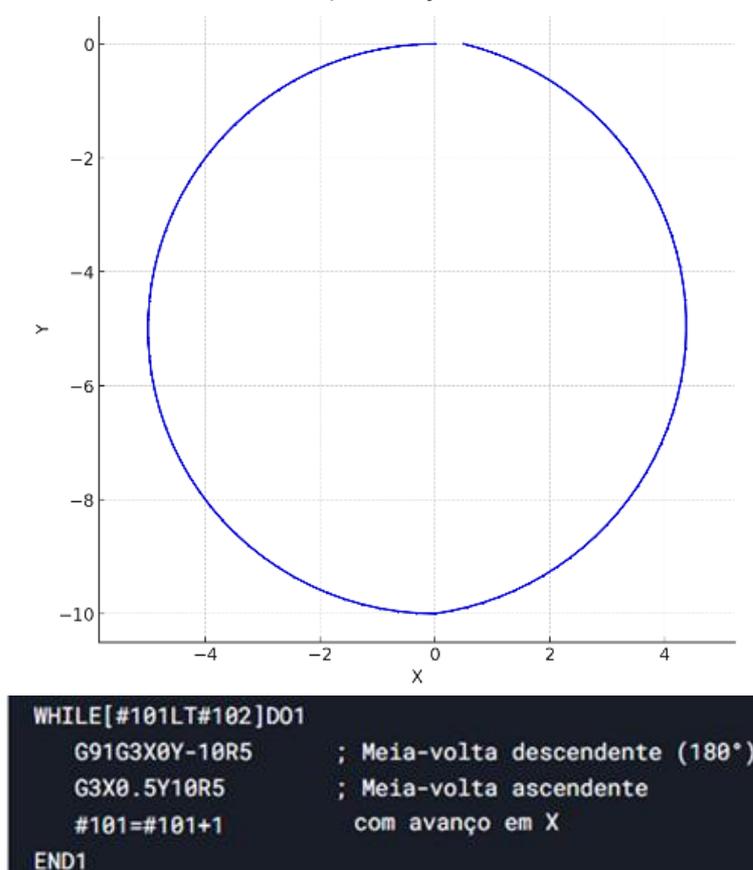
Os códigos G utilizados neste trabalho (Figura 37) foram desenvolvidos para usinar canais retilíneos com dimensões padronizadas de 40 mm de comprimento (eixo X), 20 mm de largura (eixo Y) e 10 mm de profundidade (eixo Z), empregando uma ferramenta de 10 mm de diâmetro. As trajetórias programadas seguem uma estrutura comum:

- a) Entrada segura: movimentos rápidos no eixo Z (G0Z100) e aproximação inicial (G1X-\*Y0).
- b) Ciclo principal de corte: laço WHILE com interpolações circulares parametrizadas, variando conforme a estratégia (convencional, semielíptica horizontal ou vertical).
- c) Retorno final: saída da ferramenta (G1Z200F3000).

As variáveis #101 (contador) e #102 (limite) regulam o número de repetições do ciclo, onde cada iteração corresponde a um trocoide completo. Programou-se 103 repetições na trajetória convencional (O3007), 98 repetições na semielíptica horizontal (O3008), 109 repetições na semielíptica vertical (O3009). A seleção desses valores buscou equilibrar cobertura uniforme da área de usinagem e a eficiência de remoção de cavaco, evitando sobrecarga na ferramenta.

A trajetória trocoidal convencional representa a forma mais elementar e amplamente difundida de fresamento trocoidal, caracterizando-se por movimentos circulares concêntricos sobrepostos com avanço radial constante. Essa configuração proporciona manutenção de uma taxa constante de remoção de material e elevada suavidade no contato entre ferramenta e peça, aspectos essenciais para a estabilidade do processo, contudo apresenta elevado percurso da ferramenta na região fora da zona de corte. Além disso, sua simetria geométrica facilita o controle da máquina-ferramenta e reduz a complexidade computacional associada ao planejamento da trajetória. Especificamente, essa estratégia é implementada por meio de comandos baseados em meias-voltas, como G91 G3 X0 Y-10 R5 e G91 G3 X0.5 Y10 R5, que promovem um avanço incremental de 0,5 mm por ciclo (Figura 38), tornando-a especialmente eficaz na usinagem de materiais homogêneos e canais com geometria regular.

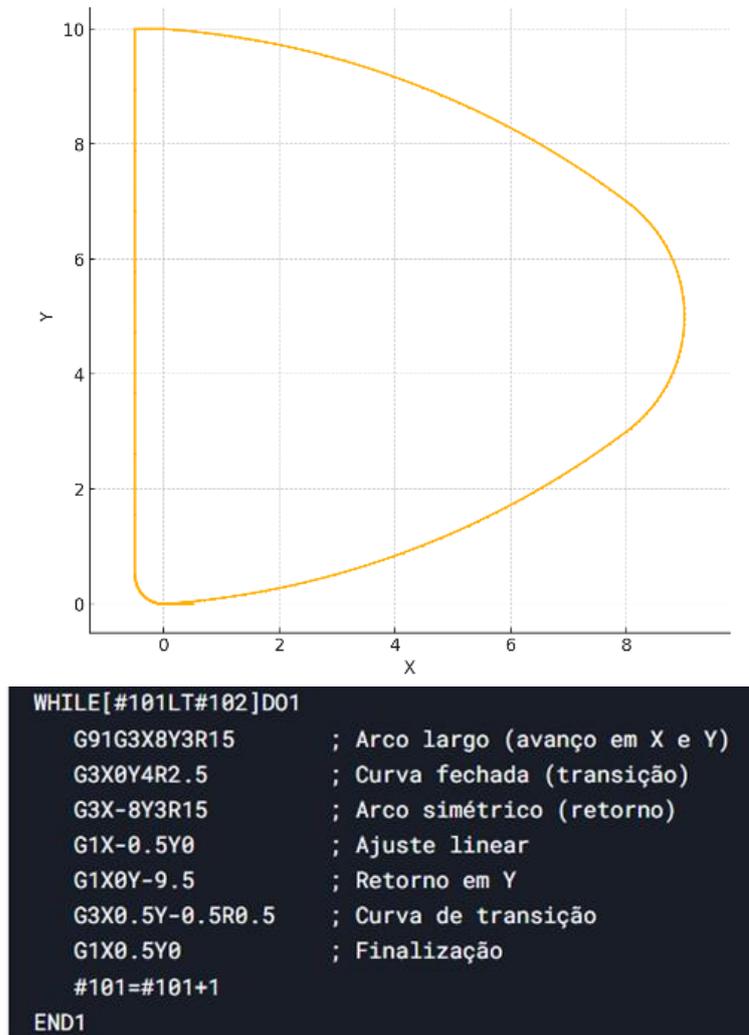
Figura 38 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal convencional



Fonte: Autoria própria (2025)

A trajetória trocoidal semielíptica vertical, cujo desenvolvimento encontra respaldo nos trabalhos de Trindade (2018) e Huang et al. (2020), foi especificamente desenvolvida para aplicações em cavidades com geometrias curvas. Ela é definida pelos comandos G91G3 X8 Y3 R15, G91G3 X0 Y4 R2.5 e G91G3 X-8 Y3 R15, e caracteriza-se por um avanço significativo na direção do eixo X, com deslocamentos incrementais de 8 mm e -8 mm, e curvaturas suaves laterais ( $R = 15$  mm) combinadas com uma curvatura central menor ( $R = 2.5$  mm), conforme mostrado na Figura 39. Essa configuração resulta em uma geometria alongada no sentido longitudinal (X), com variação moderada no eixo Y (largura total no topo da ordem de 10 mm). Essa estratégia promove elevada eficiência no avanço da ferramenta ao longo do comprimento do canal. No entanto, sua baixa amplitude transversal exige múltiplas passadas para cobertura completa da largura do canal, o que pode impactar o tempo total de usinagem em canais mais largos.

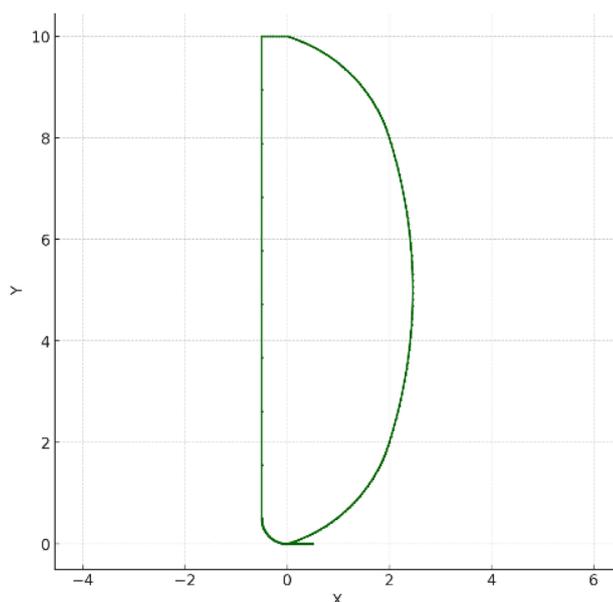
Figura 39 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal semielíptica vertical



Fonte: Autoria própria (2025)

Por sua vez, a trajetória trocoidal semielíptica horizontal, igualmente fundamentada nos estudos supracitados, foi concebida para otimizar a eficiência temporal do processo. Ela é composta pelos comandos G91G3 X2 Y2 R3, G91G3 X0 Y6 R10 e G91G3 X-2 Y2 R3, apresenta um perfil mais distribuído lateralmente, com menor avanço por ciclo no sentido de X ( $\pm 2$  mm), e maior variação transversal (Y total = 10 mm). A curvatura central ampla (R=10 mm) combinada com curvas laterais menores (R=3 mm) resulta em uma geometria mais "aberta" horizontalmente, conforme mostrado na Figura 40. Tal configuração favorece a cobertura da largura do canal, com melhor distribuição do esforço de corte na direção transversal. Em contrapartida, o avanço longitudinal reduzido compromete a produtividade ao longo do comprimento do canal, sendo, portanto, mais adequada para regiões largas e com extensão longitudinal reduzida.

Figura 40 – Estrutura do loop da trajetória trocoidal semielíptica horizontal



```

WHILE[#101LT#102]D01
G91G3X2Y2R3      ; Arco inicial (menor raio)
G3X0Y6R10       ; Curva vertical alongada
G3X-2Y2R3       ; Arco simétrico
G1X-0.5Y0       ; Ajuste em X
G1X0Y-9.5       ; Retorno em Y
G3X0.5Y-0.5R0.5 ; Curva de transição
G1X0.5Y0        ; Finalização
#101=#101+1
END1

```

Fonte: Autoria própria (2025)

Um aspecto comum e decisivo nas estratégias trocoidais semielípticas reside na implementação precisa de sequências de comandos específicos voltados à otimização das transições entre os segmentos curvos e lineares da trajetória. O desempenho dessas estratégias depende diretamente da capacidade de manter fluidez cinemática, evitando variações abruptas na direção de corte — que poderiam induzir vibrações e comprometer a qualidade superficial da peça usinada. Para isso, torna-se essencial o uso criterioso de parâmetros como o raio de curvatura e os incrementos coordenados, de modo a assegurar suavidade nas trocas de direção e estabilidade do contato ferramenta-peça.

Destacam-se, nesse contexto, os comandos G1 X0 Y-9.5 e G3 X0.5 Y-0.5 R0.5, amplamente utilizados nas configurações semielípticas, os quais promovem uma saída retilínea controlada da zona de corte e reentrada suave por meio de arcos de pequeno raio (0,5 mm). Essa estrutura foi cuidadosamente projetada para atenuar

vibrações e prevenir a formação de imperfeições superficiais, conforme demonstrado por Deng et al. (2020) e Huang et al. (2020), sendo determinante para a qualidade final da usinagem, especialmente em geometrias críticas ou materiais com baixa tolerância a descontinuidades mecânicas.

A análise comparativa entre as trajetórias evidencia que a seleção da estratégia mais adequada deve considerar uma ponderação criteriosa entre os requisitos geométricos da peça e os parâmetros operacionais do processo. Embora a trajetória convencional ainda mantenha sua relevância em aplicações que priorizam produtividade em geometrias simples, como apontado por Rauch et al. (2009), as variantes semielípticas demonstram vantagens superiores em cenários que exigem controle refinado das forças de usinagem ou envolvem geometrias mais complexas. Especificamente, a versão horizontal mostra-se mais eficaz na usinagem de grandes áreas planas, em virtude de sua maior amplitude transversal, enquanto a variante vertical apresenta desempenho superior em cavidades profundas com restrições laterais, graças ao seu avanço mais pronunciado no sentido longitudinal.

A Tabela 8 apresenta um comparativo geral entre as trajetórias estudadas, destacando suas respectivas características geométricas, vantagens operacionais e contextos de aplicação recomendados.

Tabela 8 – Comparativo geral das trajetórias trocoidais

<b>Critério</b>	<b>Convencional</b>	<b>Semi-elíptica Horizontal</b>	<b>Semi-elíptica Vertical</b>
<b>Tipo de interpolação</b>	Circular.	Circular combinada com linear.	Circular combinada com linear.
<b>Comandos principais</b>	G91 G3 X0 Y-10 R5 G91 G3 X0.5 Y10 R5	G91 G3 X2 Y2 R3 G3 X0 Y6 R10 G3 X-2 Y2 R3 G1 X0 Y-9.5 G3 X0.5 Y-0.5 R0.5	G91 G3 X8 Y3 R15 G3 X0 Y4 R2.5 G3 X-8 Y3 R15 G1 X0 Y-9.5 G3 X0.5 Y-0.5 R0.5
<b>Número de ciclos (repetições)</b>	103	98	109
<b>Vantagens operacionais</b>	Simplicidade de programação; menor carga de processamento CNC.	Excelente cobertura lateral; distribuição equilibrada do esforço transversal; bom para áreas planas.	Elevado avanço longitudinal; eficaz em canais estreitos e longos.
<b>Desvantagens operacionais</b>	Elevado percurso de ferramenta na região fora da zona de corte.	Menor produtividade longitudinal; maior complexidade de codificação.	Menor cobertura transversal; maior complexidade de codificação.
<b>Aplicações recomendadas</b>	Geometrias homogêneas.	Canais largos e curtos; áreas planas extensas.	Cavidades profundas e estreitas; geometrias complexas com restrições laterais.
<b>Tratamento das transições</b>	Não há transição programada específica.	Transições otimizadas com G1 e G3 R0.5 para saída e entrada suave.	Transições otimizadas com G1 e G3 R0.5 para saída e entrada suave.

Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.1.2 Cálculo do Comprimento das Trajetórias Trocoidais

A avaliação do comprimento percorrido pela ferramenta em cada estratégia trocoidal permite compreender a eficiência geométrica e operacional das trajetórias. Esse parâmetro é fundamental não apenas para estimar o tempo de usinagem, mas também para o cálculo do trabalho realizado pela ferramenta, uma vez que o trabalho mecânico é diretamente proporcional à força de usinagem e à distância percorrida. Em operações de desbaste, trajetórias mais longas podem indicar maior demanda energética, impactando o consumo de potência da máquina e o desgaste da ferramenta. Por outro lado, uma trajetória bem distribuída ao longo da cavidade pode otimizar a remoção de material com menor esforço instantâneo, resultando em melhor eficiência global (Niaki *et al.*, 2019; Šajgalík *et al.*, 2020).

A trajetória trocoidal convencional consiste em dois arcos definidos por comandos G-code em modo incremental, ambos com raio aproximado de 5 mm. Dessa forma, o trajeto percorrido pela ferramenta em cada ciclo equivale ao perímetro de uma circunferência de 5 mm de raio, totalizando aproximadamente 31,4 mm.

Para calcular o comprimento da trajetória trocoidal semi-elíptica vertical foi necessário analisar cada trecho separadamente, considerando os incrementos de coordenadas e os respectivos raios. A primeira linha, G91 G3 X8 Y3 R15, representa um movimento em arco no sentido anti-horário, com incremento de 8 mm em X e 3 mm em Y, e raio de 15 mm. A distância entre o ponto inicial e o final desse arco (corda) pode ser calculada pela equação 10.

$$c = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \quad (10)$$

Substituindo os valores, temos  $c = \sqrt{8^2 + 3^2} = \sqrt{73} \approx 8,544$  mm. Com essa corda e o raio conhecido, o ângulo subtendido pelo arco pode ser estimado pela equação 11.

$$\theta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{c}{2R}\right) \quad (11)$$

Esse é o modelo mais intuitivo para situações de usinagem com G3/G2, pois parte de grandezas que são fáceis de obter com coordenadas relativas. Substituindo temos  $\theta \approx 0,578$  rad. O comprimento do arco é dado pela equação 12.

$$L = R \cdot \theta \quad (12)$$

Desse modo, os trechos G91 G3 X8 Y3 R15 e G91 G3 X-8 Y3 R15 resultam em um comprimento de, aproximadamente, 8,67 mm, cada. O trecho G91 G3 X0 Y4 R2.5, tem incremento apenas em Y. A corda mede 4 mm, e o raio é 2.5 mm. Portanto, resulta em um comprimento de 4,63 mm. As linhas G91 G1 X0 Y-9.5, G91 G1 X0.5 Y0 e G91 G1 X0.5 Y0 representam movimentos retilíneos de 9,5 mm e 0,5 mm de comprimento. Por fim, o comando G91 G3 X0.5 Y-0.5 R0.5 define um pequeno arco com raio de 0.5 mm e deslocamentos pequenos. A corda mede 0,785 mm de comprimento. Somando todos os comprimentos, a trajetória trocoidal semi-elíptica vertical possui um comprimento total de 32,76 mm, por ciclo.

De forma semelhante, o cálculo do comprimento da trajetória trocoidal semielíptica horizontal exigiu a análise individual de cada segmento. Os arcos definidos pelos comandos G91 G3 X2 Y2 R3 e G91 G3 X-2 Y2 R3, ambos com variações de  $\Delta X = 2 \text{ mm}$  e  $\Delta Y = 2 \text{ mm}$ , e raio de 3 mm, resultam em um comprimento aproximado de 2,93 mm cada. O arco definido por G91 G3 X0 Y6 R10, com deslocamento exclusivamente vertical, apresenta uma corda de 6 mm e gera um comprimento de arco em torno de 6,10 mm, considerando a curvatura proporcionada pelo raio de 10 mm. Os trechos de movimento retilíneo e o arco de entrada da ferramenta, com raio de 0,5 mm, são equivalentes aos empregados na trajetória semielíptica vertical e totalizam 11,285 mm. Assim, ao somar todos os segmentos, obtém-se um comprimento total de 23,25 mm por ciclo da trajetória trocoidal semielíptica horizontal.

## 5.2 ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM

Esta seção concentra-se na análise da força de usinagem como parâmetro crítico para a avaliação do desempenho do processo. A análise contempla o cálculo da pressão específica de corte do material ensaiado e a influência das diferentes condições de refrigeração sobre a magnitude das componentes da força de usinagem no fresamento trocoidal.

### 5.2.1 Cálculo da pressão específica de corte do material ensaiado

A pressão específica de corte ( $K_s$ ) do aço AISI 4340 ( $40 \pm 2 \text{ HRC}$ ) foi determinada experimentalmente mediante ensaios com variação do avanço por dente ( $f_z = h = 0.02 - 0.30 \text{ mm}$ ), conforme detalhado na Tabela 9. Para cada condição, registrou-se a força de corte ( $F_c$ ) com profundidade de corte constante ( $a_p = b = 0,5 \text{ mm}$ ), calculando  $K_s$  por meio da equação 1.

$$K_s = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{b \cdot h} \quad (13)$$

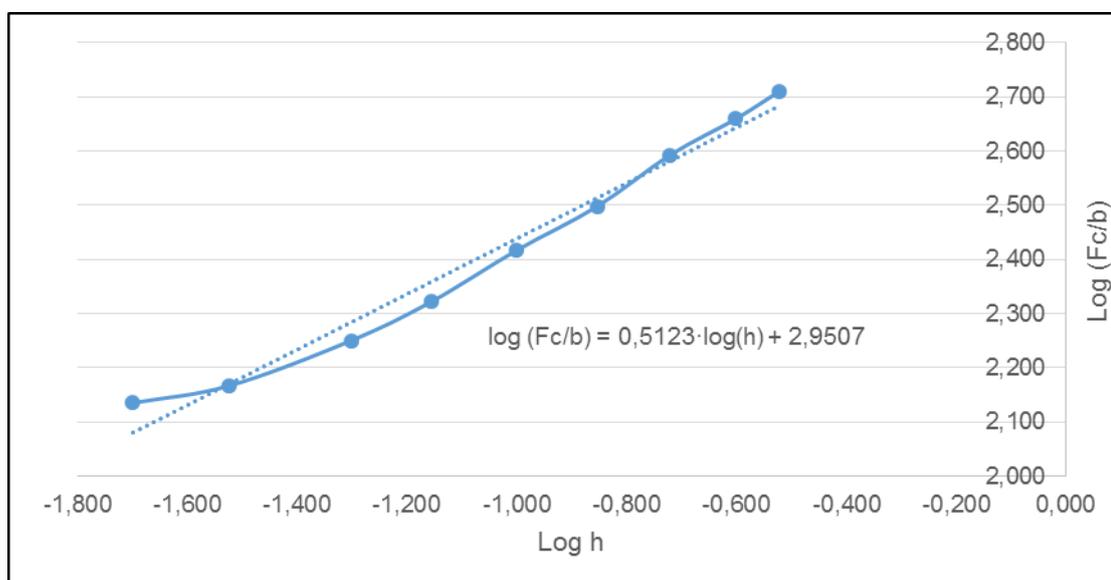
Tabela 9 – Pressão específica de corte do aço AISI 4340 com 40±2 HRC

$f_z = h$ (mm/rot)	Velocidade de avanço $V_f$ (mm/min)	Força de corte medida $F_c$ (N)	$a_p = b$ (mm)	$K_s = (F_c/A)$ (N/mm <sup>2</sup> )
0,02	256	68,24	0,50	6824,00
0,03	384	73,43	0,50	4895,00
0,05	640	88,99	0,50	3559,60
0,07	896	105,06	0,50	3001,71
0,10	1280	130,63	0,50	2612,50
0,14	1792	157,34	0,50	2247,71
0,19	2432	195,75	0,50	2060,53
0,25	3200	228,14	0,50	1825,12
0,30	3840	256,33	0,50	1708,87

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados revelaram o comportamento típico de materiais metálicos: redução não linear de  $K_s$  com o aumento de  $h$  (Figura 41), compatível com o modelo de Kienzle.

Figura 41 – Relação entre a força de corte e o avanço



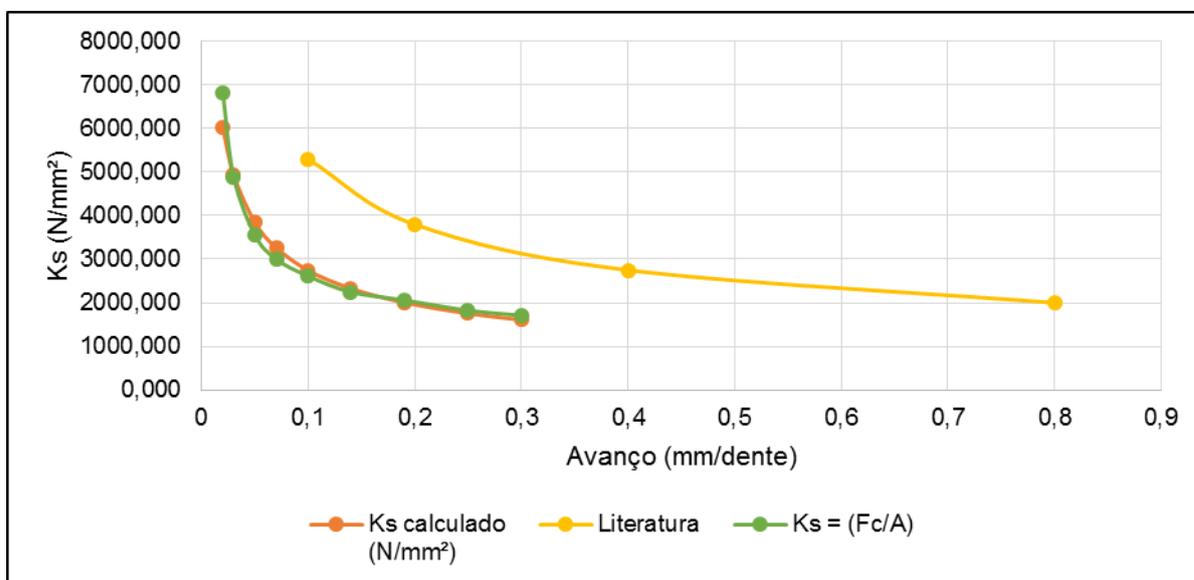
Fonte: Autoria própria (2025)

A fim de caracterizar a influência do avanço sobre a pressão específica de corte, os dados foram linearizados por meio de transformações logarítmicas. A linearização logarítmica dos dados (Figura 42) permitiu obter as constantes do material, mostradas na equação 14.

$$\log(K_s) = -0,4877 \cdot \log(h) + 2,9507 \quad (14)$$

$$K_{s1} = 10^{2,9507} \approx 892,69 \text{ N/mm}^2 \text{ (para } h=1\text{mm); } z = 0,4877$$

Figura 42 – Pressão específica de corte do aço AISI 4340 em função do avanço



Fonte: Autoria própria (2025)

Embora os valores de  $K_s$  (1708 - 6824 N/mm<sup>2</sup>) estejam na faixa superior à literatura (1600 - 4200 N/mm<sup>2</sup> para condições similares), as discrepâncias atribuem-se às diferenças metodológicas (envolvimento radial de 5%, corte a seco). O alto coeficiente de determinação ( $R^2 > 0.97$ ) valida a aderência ao modelo de Kienzle.

A aplicação direta de  $K_s$  mostrou-se restrita devido à natureza dinâmica das trajetórias trocoidais, onde a espessura do cavaco varia continuamente. Portanto, as análises de desempenho (forças, trabalho mecânico) basearam-se exclusivamente em medições experimentais diretas, que capturam os efeitos não modeláveis por abordagens teóricas.

### 5.2.1.1 Cálculo da Força de Corte e Configuração Experimental

No fresamento trocoidal, a ferramenta percorre trajetórias com sobreposição lateral reduzida, resultando em baixos níveis de envolvimento radial. Essa estratégia proporciona um corte intermitente, termicamente mais eficiente e com melhor distribuição da carga entre as arestas da ferramenta. Essas características favorecem

a estabilidade do processo, especialmente em materiais de alta resistência, como o aço AISI 4340 (dos Santos et al., 2024; Waszczuk, 2020; Šajgalík et al., 2020).

Diferentemente do fresamento convencional em cheio, no qual a ferramenta remove material por toda a sua largura (100% de envolvimento radial), o fresamento trocoidal adota profundidades radiais reduzidas. No presente estudo, por exemplo, a usinagem foi realizada com uma fresa de sete arestas de corte e 10 mm de diâmetro, utilizando um envolvimento radial de apenas 5% ( $a_e = 0,5$  mm), o que caracteriza uma condição de corte leve, com esforço mecânico significativamente reduzido.

Para fins de comparação e calibração do dinamômetro, foi estimada a força de corte na condição de fresamento em cheio do aço utilizado nos experimentos de fresamento trocoidal, o AISI 4340 com  $40 \pm 2$  HRC. Nessa condição, utilizou-se o modelo empírico de Kienzle para prever a força máxima de corte ( $F_c$ ) no fresamento desse aço. Os parâmetros empregados foram  $K_{s1} = 892,69$  N/mm<sup>2</sup> e  $z = 0,4877$ , obtidos por regressão linear experimental. Considerando um avanço por dente de  $h = 0,06$  mm e largura de corte de  $b = 10$  mm (igual ao diâmetro da ferramenta) – parâmetros de corte usados nesse trabalho aplicando fresamento trocoidal – a pressão específica de corte foi de 4372,81 N/mm<sup>2</sup> (ver equação 16).

$$K_s = 892,69 \cdot h^{-0,4877} \approx 4372,81 \text{ N/mm}^2 \quad (16)$$

Com isso, a força de corte estimada para a condição de fresamento em cheio foi 2623,69 N (equação 17).

$$F_c = K_s \cdot (h \cdot b) = 4372,81 \cdot (0,06 \cdot 10) = 2623,69 \text{ N} \quad (17)$$

Esse valor representa a maior solicitação esperada sobre a ferramenta e a máquina, justificando a calibração do dinamômetro com base nesse cenário mais crítico. Vale destacar que os testes utilizados para obter os parâmetros  $K_{s1}$  e  $z$  foram realizados com uma fresa de metal duro com quatro arestas ( $z = 4$ ), diâmetro de 10 mm, operando a uma velocidade de corte de 100 m/min.

Dessa forma, embora a força de corte estimada para o fresamento em cheio tenha sido de aproximadamente 2623,69 N, espera-se uma redução expressiva desse valor na aplicação da estratégia trocoidal, devido ao seu menor envolvimento radial.

## 5.2.2 Influência do tipo de refrigeração sobre as componentes da força de usinagem ( $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ )

A refrigeração no processo de usinagem influencia diretamente as forças envolvidas na remoção de material. A combinação entre o tipo de refrigeração e a trajetória da ferramenta pode impactar significativamente a força de usinagem. Este parágrafo analisa as componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  no fresamento trocoidal do aço AISI 4340 temperado e revenido, com três trajetórias (C, SH e SV), sob corte a seco e com fluido abundante.

### 5.2.2.1 Impacto na trajetória trocoidal convencional (C)

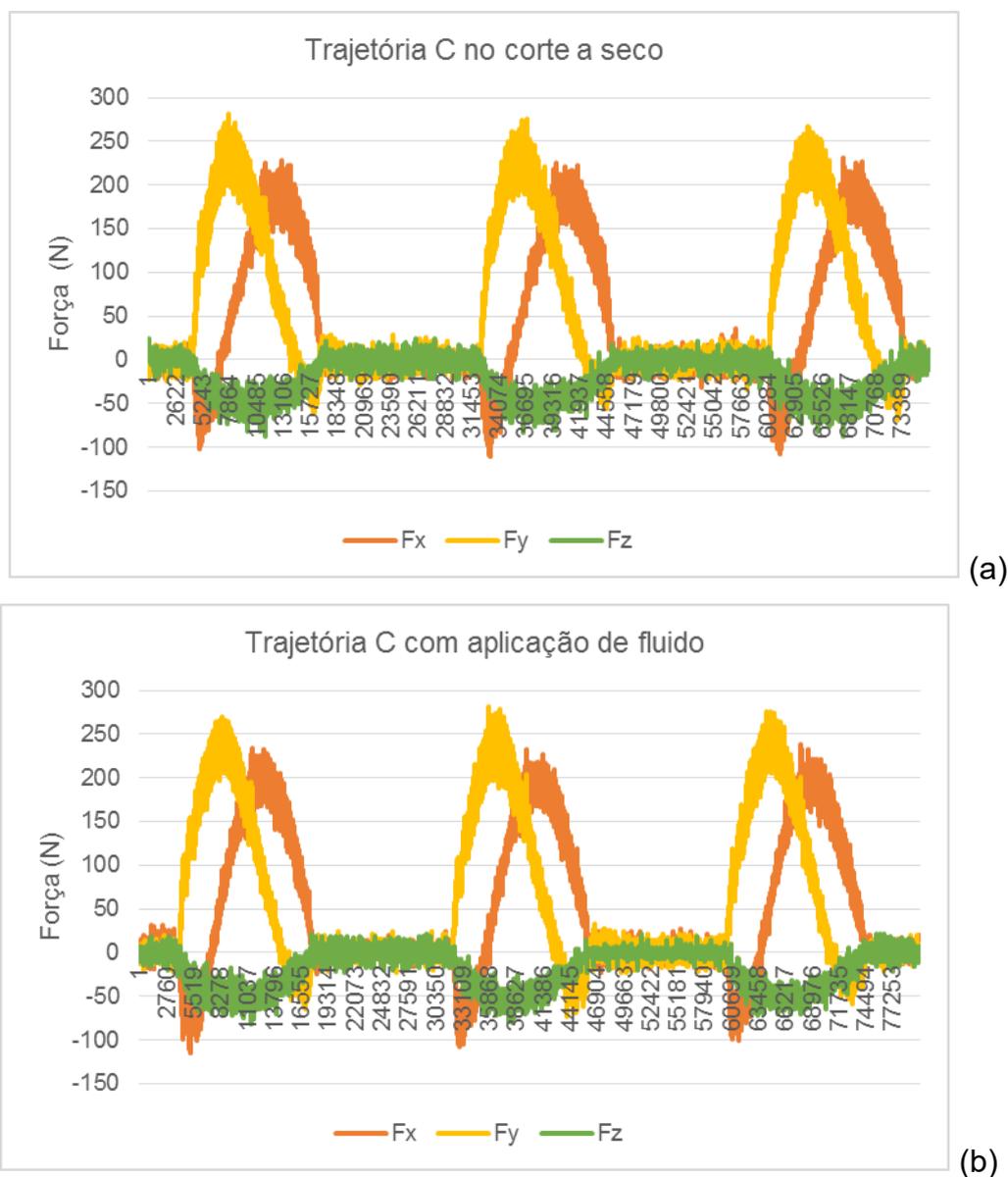
A Figura 43 apresenta as componentes de força ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) registradas durante o fresamento trocoidal com trajetória convencional (trajetória C), sob duas condições distintas: corte a seco e com aplicação abundante de fluido de corte. A figura retrata o perfil das forças em três voltas completas (três trocóides) da trajetória estudada.

Observa-se que, em ambas as condições, os sinais de força apresentam variações cíclicas típicas da usinagem com estratégia trocoidal, evidenciando os momentos de entrada e saída da ferramenta no material.

No corte a seco (Figura 43.a), as componentes  $F_x$  e  $F_y$  atingem picos mais elevados, ultrapassando 200 N e 250 N, respectivamente. Além disso, há uma maior oscilação nos sinais de força, indicando uma instabilidade durante o processo, possivelmente associada ao aumento de temperatura e à ausência de lubrificação e refrigeração. A componente  $F_z$ , responsável pela força axial, apresenta comportamento mais estável, com oscilações na ordem de aproximadamente  $\pm 50$  N.

Na condição com fluido de corte (Figura 43.b), observa-se que o comportamento geral do processo permanece similar. Os valores máximos de  $F_x$  e  $F_y$  e  $F_z$  são similares aos da condição a seco. Porém, percebem-se sinais mais regulares e com menor ruído. Essa diferença sugere que a aplicação de fluido contribui para a redução do atrito entre ferramenta e peça, além de auxiliar na dissipação do calor gerado durante o processo.

Figura 43 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória convencional (C): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte



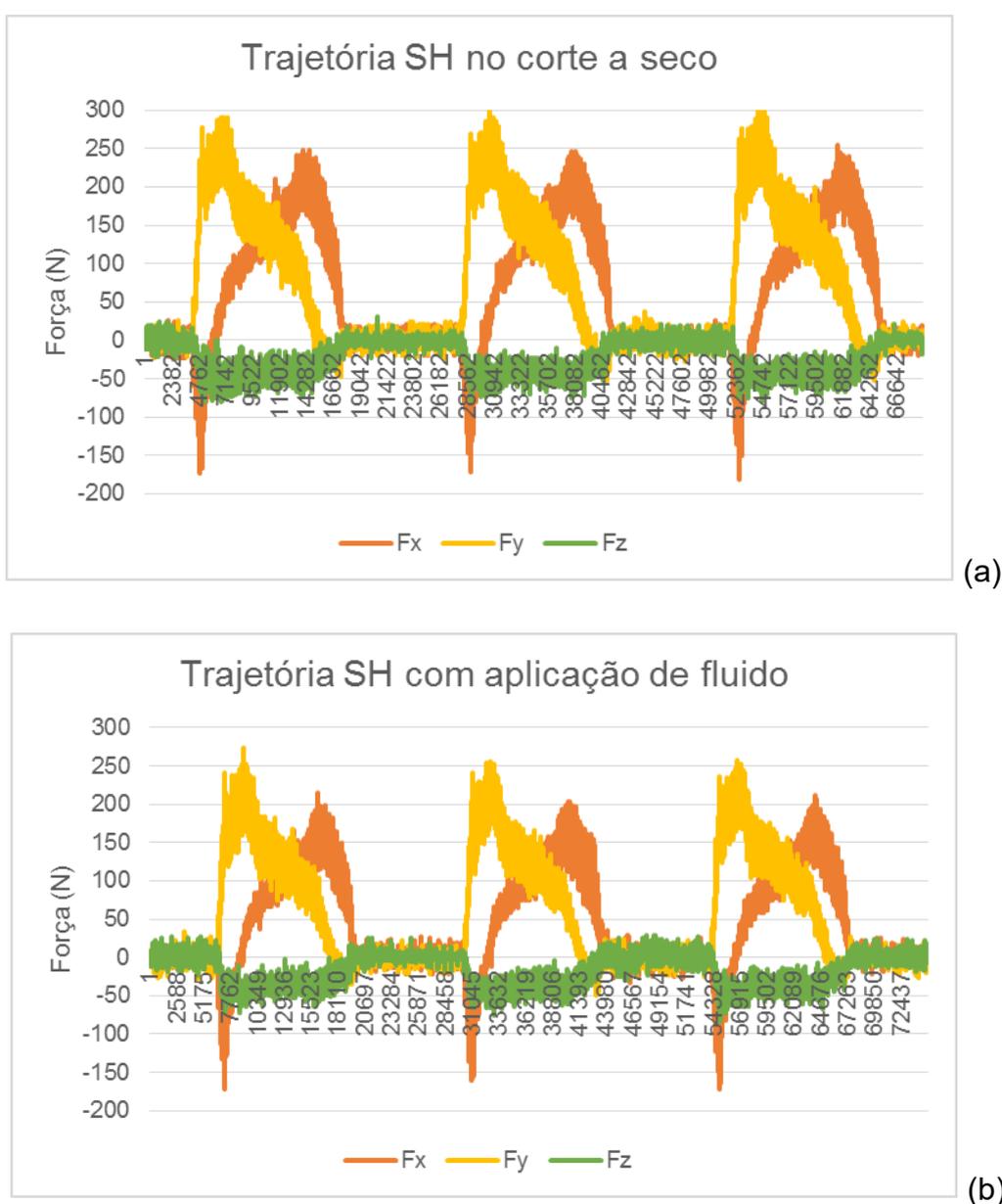
Fonte: Autoria própria (2025)

Em resumo, na trajetória C, observa-se um padrão cíclico bem definido tanto em corte a seco quanto com fluido. As componentes  $F_x$  e  $F_y$  apresentam picos regulares e espaçados, com amplitudes próximas de 250 N. A aplicação de fluido proporciona uma leve redução nas amplitudes das forças, mas o comportamento geral do processo permanece similar. A componente  $F_z$  mantém-se relativamente estável, com pequenas oscilações ( $\sim \pm 50$  N), evidenciando boa estabilidade vertical do processo.

### 5.2.2.2 Impacto na trajetória trocoidal semielíptica horizontal (SH)

A Figura 44 apresenta os gráficos as componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  da força de usinagem obtidas durante o fresamento trocoidal com trajetória semielíptica horizontal (trajetória SH), nas condições de usinagem a seco (a) e com aplicação abundante de fluido de corte (b). A figura apresenta o perfil das forças registradas durante três voltas completas da trajetória trocoidal analisada.

Figura 44 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória semielíptica horizontal (SH): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte



Fonte: Autoria própria (2025)

Na usinagem a seco (Figura 44.a), observam-se valores máximos de força próximos a 250 N para  $F_x$ , a 300 N para  $F_y$  e valores abaixo de 100 N para  $F_z$ , com um padrão relativamente regular ao longo dos ciclos. As curvas apresentam transições suaves, possivelmente associadas à geometria mais alongada da trajetória SH, que tende a suavizar a entrada e saída da ferramenta na zona de corte.

Com a aplicação de fluido de corte (Figura 44.b), nota-se uma diminuição nas amplitudes das forças  $F_x$  e  $F_y$ , além de uma redução do ruído nos sinais. Observou-se redução de  $\approx 20\%$  no pico  $F_x$  e de  $\approx 16\%$  no pico de  $F_y$ . A força axial  $F_z$  continua apresentando o menor valor entre as três componentes, com um perfil mais estável e suave, especialmente com fluido, o que sugere um menor esforço vertical sobre a ferramenta.

De modo geral, para a trajetória SH, o corte a seco resulta em sinais mais irregulares e assimétricos, com picos de força lateral ( $F_x$  e  $F_y$ ) mais acentuados – comportamento similar ao reportado por Pleta *et al.* (2019) em Inconel 718, onde forças laterais variaram 35% mais em condições secas. A aplicação de fluido contribuiu para uma expressiva melhoria na regularidade dos sinais, com reduções de amplitude ( $\approx 20\%$  em  $F_x$ ,  $\approx 16\%$  em  $F_y$ ) alinhadas aos 18-22% observados no estudo referido. Notavelmente, a força axial ( $F_z$ ) permaneceu com baixa variação em ambas as condições, diferindo dos resultados em superligas, onde  $F_z$  apresentou maior sensibilidade ao fluido.

### 5.2.2.3 Impacto na trajetória trocoidal semielíptica vertical (SV)

A Figura 45 exibe os sinais das componentes de força ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) obtidos durante o fresamento com trajetória trocoidal semielíptica vertical (SV), considerando duas condições distintas de usinagem: a seco (a) e com aplicação abundante de fluido de corte (b). Os dados apresentados correspondem a três ciclos consecutivos da trajetória, ilustrando o comportamento dinâmico da ferramenta durante o processo. No total, foram executados 109 ciclos para a usinagem de um único canal com 40 mm de comprimento.

Na condição a seco (Figura 45.a), com a análise dessa pequena amostra de dados (três trocoides), observa-se que as forças apresentam comportamento cíclico, com picos nas componentes  $F_x$  e  $F_y$  superiores a 260 N e 300 N, respectivamente. A

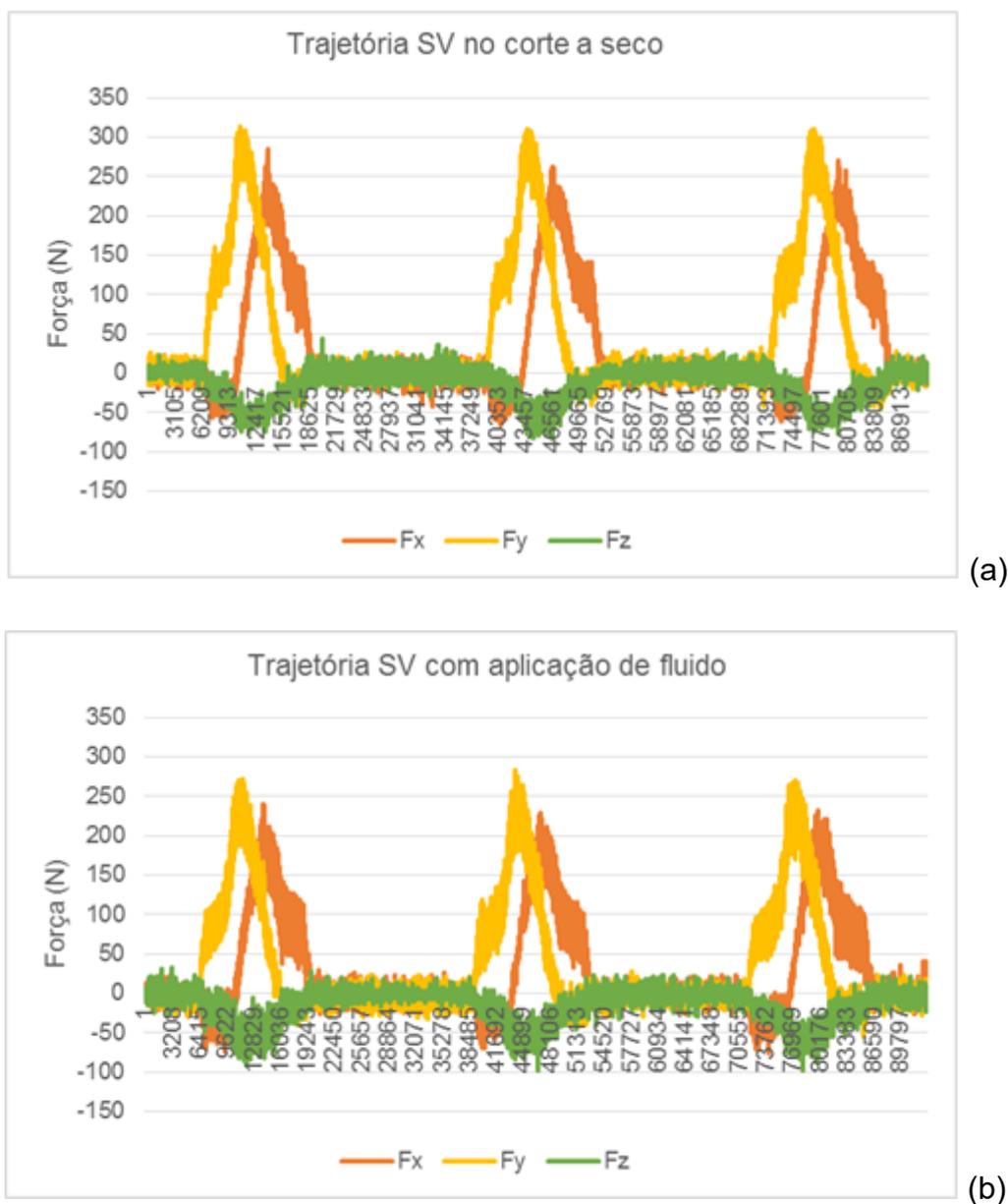
componente  $F_z$  se mantém mais baixa, com valores inferiores a 100 N. A distribuição das forças ao longo do tempo sugere um corte com transições relativamente suaves e espaçadas, possivelmente devido à geometria mais verticalizada da trajetória, que parece concentrar os esforços em momentos mais definidos do avanço da ferramenta.

Com a aplicação de fluido de corte (Figura 45.b), observa-se uma redução nas amplitudes das forças  $F_x$  e  $F_y$  de  $\approx 12\%$  (com picos de  $F_x$  e  $F_y$  próximos a 230 N e 270 N, respectivamente). Além disso, há uma diminuição visível no ruído dos sinais e uma maior regularidade na forma das curvas. A força  $F_z$  mantém um comportamento semelhante, embora com leve aumento em relação à condição a seco, o que pode estar relacionado a uma alteração na penetração axial da ferramenta com a presença do fluido.

Embora tanto a SH quanto a SV sejam variações semi-elípticas, o comportamento das forças de usinagem sob aplicação de fluido de corte difere entre elas devido à disposição espacial da trajetória e ao padrão de imersão da ferramenta na zona de corte. A trajetória SH, horizontal, tende a manter a ferramenta mais superficial ao longo do avanço, o que favorece a ação do fluido de corte, permitindo melhor penetração do líquido na interface ferramenta-material. Isso promove um efeito mais eficaz de lubrificação e refrigeração, especialmente nas direções laterais ( $F_x$  e  $F_y$ ), o que justifica as reduções de aproximadamente 20% e 16%, respectivamente.

Por outro lado, na trajetória SV, a orientação vertical acentuada faz com que a ferramenta penetre de forma mais profunda no canal durante o corte. Isso dificulta a ação contínua do fluido refrigerante, especialmente nas zonas mais internas da trajetória, onde há menor acesso ao jato de fluido e maior confinamento de cavacos. Assim, embora ainda haja redução de forças com o uso do fluido, essa redução é proporcionalmente menor — cerca de 12% —, devido à menor efetividade da lubrificação nas regiões críticas da trajetória.

Figura 45 – Componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) durante o fresamento trocoidal com trajetória semielíptica vertical (SV): (a) usinagem a seco; (b) usinagem com aplicação de fluido de corte



Fonte: Autoria própria (2025)

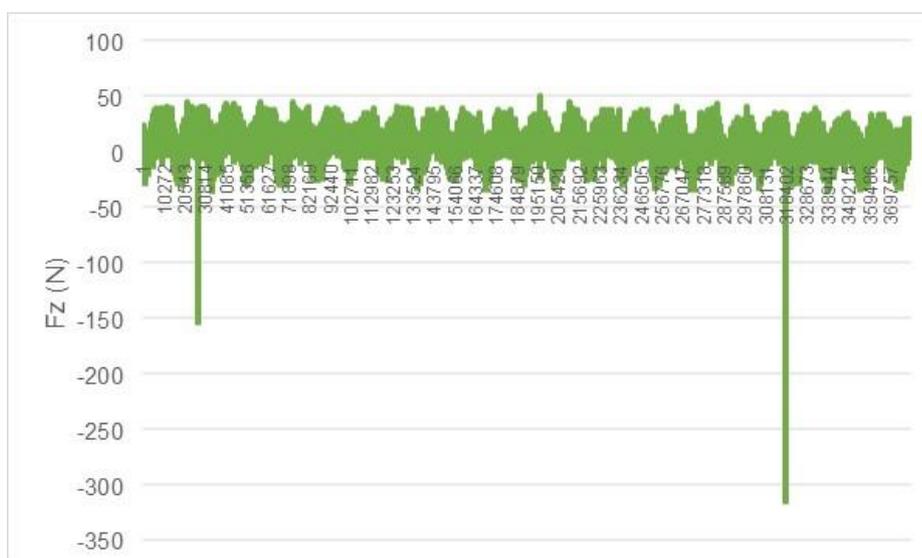
### 5.2.2.3 Análise global da força de usinagem

Durante a análise dos dados brutos de força, foram identificados pontos isolados de alta magnitude, indicativos de instabilidades transitórias no processo de usinagem, como mostrado na Figura 46. Os maiores desses eventos extremos foram registrados como  $F_x$  pico,  $F_y$  pico e  $F_z$  pico, correspondendo aos picos absolutos para

cada componente de força. Tais picos podem resultar de microlascamentos ou descontinuidades na aresta da ferramenta, que provocam variações abruptas na carga de corte, além de eventos como falta ou insuficiência momentânea de refrigeração ou lubrificação, os quais podem gerar aumentos localizados na força e comprometer a estabilidade do processo.

Para mitigar o impacto desses valores atípicos e garantir uma avaliação estatística robusta, selecionaram-se os 1.000 maiores valores de cada componente de força. Foi obtida a média deles (denominada "Média das forças pico (n=1000)" para  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e seus respectivos desvios-padrão (DP), de modo a fornecer indicadores quantitativos da magnitude e da variabilidade das forças máximas durante a usinagem. Os elevados valores de desvio padrão confirmam a presença de múltiplos picos ao longo do processo, possivelmente associados aos fenômenos transitórios mencionados.

Figura 46 – Picos de  $F_z$  no sinal de força da trajetória trocoidal convencional a seco



Fonte: Autoria própria (2025)

Além disso, a força resultante máxima ( $F_{u\text{máx}}$ ) foi obtida pela combinação vetorial das três componentes, conforme descrito na equação 18, fornecendo uma métrica integral da carga aplicada à ferramenta. Esses dados complementam as análises pontuais e temporais anteriores, estabelecendo uma base quantitativa objetiva para comparar o desempenho das diferentes estratégias de usinagem e condições de refrigeração avaliadas.

$$Fu_{m\acute{a}x} = \sqrt{Fx_{med_{pico}}^2 + Fy_{med_{pico}}^2 + Fz_{med_{pico}}^2} \quad (18)$$

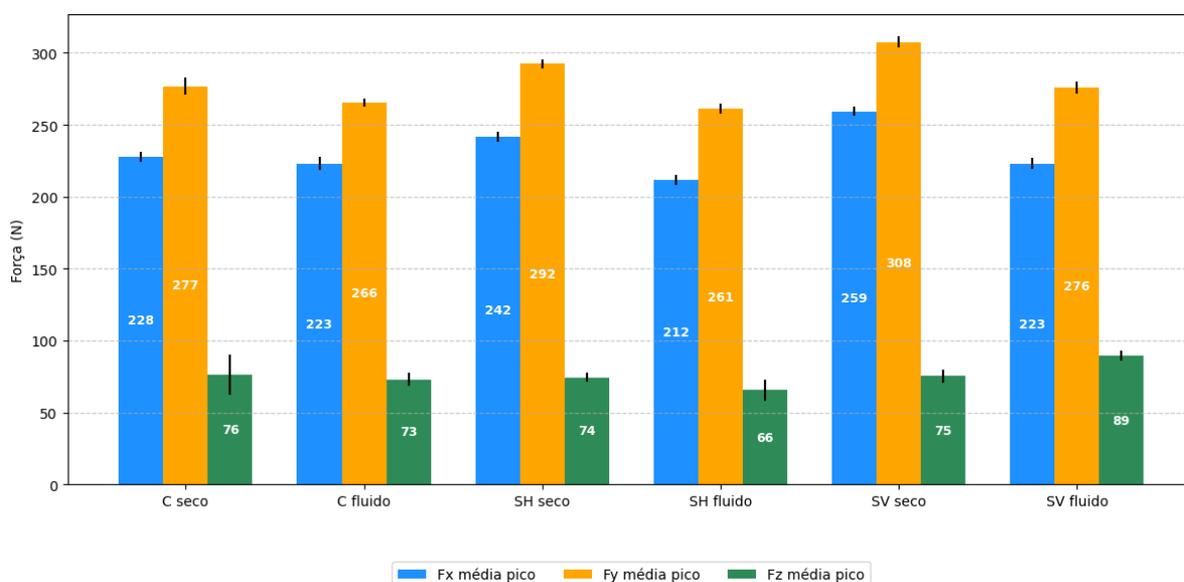
A Tabela 10 apresenta os valores estatísticos das componentes de força de usinagem para diferentes estratégias de trajetória e condições de refrigeração, incluindo valores de pico, média das forças de pico (n=1000) e seus desvios padrão. A Figura 47 complementa esses dados com uma visualização gráfica da média das forças pico (n=1000), facilitando a comparação entre as condições testadas. A análise conjunta evidencia o impacto da geometria da trajetória e do fluido de corte na magnitude e estabilidade das forças durante o fresamento trocoidal. Os dados retratam o valor absoluto das forças, pois o foco é a intensidade da força, não sua direção.

Tabela 10 – Estatísticas das forças de usinagem para diferentes trajetórias e condições de refrigeração

Estratégia	Fx pico (N)	Fy pico (N)	Fz pico (N)	Fx média pico (N)	DP Fx (N)	Fy média pico (N)	DP Fy (N)	Fz média pico (N)	DP Fz (N)	Fu máx (N)
<b>C seco</b>	246,00	302,80	351,60	228,00	3,42	276,84	6,02	76,47	13,90	366,70
<b>C fluido</b>	256,00	283,20	128,80	223,18	4,78	265,62	2,84	73,01	4,45	354,53
<b>SH seco</b>	261,60	312,40	93,60	241,85	3,32	292,40	3,11	74,33	3,11	386,67
<b>SH fluido</b>	252,00	283,20	140,40	211,88	3,56	261,13	3,35	65,72	7,30	342,64
<b>SV seco</b>	285,20	332,00	152,40	259,35	3,33	307,62	3,64	75,33	4,62	409,35
<b>SV fluido</b>	252,00	302,80	113,20	222,94	3,90	275,93	3,88	89,41	3,66	365,83

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 47 – Comparação da média das forças pico (n=1000) com desvios padrão para diferentes estratégias e condições de refrigeração



Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme observado Tabela 10, a trajetória semielíptica vertical (SV) a seco foi a que registrou os maiores esforços de usinagem entre todas as condições testadas, com  $F_x$  pico de 285,2 N,  $F_y$  pico de 332,0 N e força resultante máxima ( $F_u$  máx.) de 409,35 N. Esses valores indicam uma maior intensidade de corte, sobretudo nas componentes laterais, refletindo o caráter mais agressivo da trajetória vertical sem a ação refrigerante.

A aplicação de fluido de corte resultou em reduções significativas na magnitude da força de usinagem em todas as trajetórias avaliadas. Na trajetória SV, por exemplo, observou-se uma diminuição de 36,4% na  $F_z$  pico, passando de 152,4 N para 113,2 N, e de 14,1% na força resultante máxima ( $F_u$  máx), que caiu de 409,35 N para 365,83 N. Já na trajetória semielíptica horizontal (SH), os efeitos da refrigeração foram ainda mais expressivos nas componentes laterais:  $F_x$  média pico foi reduzido de 241,85 N para 211,88 N (queda de 12,4%) e  $F_y$  média pico de 292,4 N para 261,13 N (redução de 10,7%). Esses resultados evidenciam o impacto positivo da refrigeração sobre a suavização do processo de corte, com menor variabilidade e intensidade de forças. Esse comportamento está alinhado com a literatura, que atribui tais efeitos à melhoria da lubrificação na interface ferramenta-peça e ao controle térmico mais eficiente durante a usinagem.

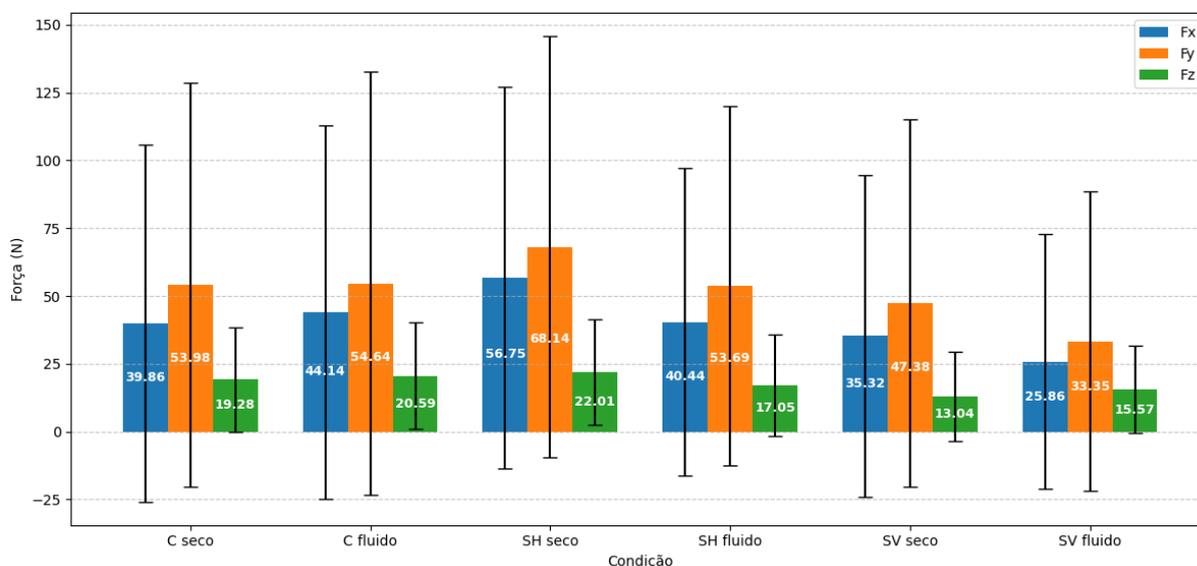
Entre todas as configurações, a trajetória SH com fluido apresentou os menores desvios-padrão nas três direções: DP  $F_x$  = 3,56 N, DP  $F_y$  = 3,35 N e DP  $F_z$  = 7,3 N, indicando uma baixa variabilidade nas forças ao longo da operação. Essa característica é desejável em usinagem de precisão, pois tende a minimizar vibrações e desgaste irregular da ferramenta. Além disso, essa trajetória também apresentou a menor força resultante máxima ( $F_u$  máx = 342,64 N), o que a torna vantajosa quando o objetivo é reduzir as cargas mecânicas no processo.

A trajetória convencional (C) manteve desempenho intermediário. Na condição a seco, apresentou  $F_x$  média pico de 228,0 N e  $F_y$  média pico de 276,84 N, com força de usinagem máxima de 366,70 N. Com fluido, esses valores diminuíram levemente para 223,18 N e 265,62 N, respectivamente, com  $F_u$  máxima de 354,53 N, reforçando seu comportamento estável, porém menos sensível à lubrificação em comparação às estratégias semielípticas.

Além da análise das forças pico, também foram analisadas a força média global para cada trajetória. A Figura 48 apresenta as componentes das forças de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) obtidas nas diferentes estratégias de usinagem (convencional - C, semielíptica horizontal - SH e semielíptica vertical - SV), sob condições a seco e com fluido de corte abundante. Os valores apresentados correspondem às médias das forças registradas durante os testes, acompanhados de seus respectivos desvios padrão.

Observa-se que os valores de força apresentam desvios padrão relativamente elevados. Essa característica é esperada em processos de fresamento trocoidal devido à natureza oscilatória da trajetória, que impõe variações periódicas na espessura de cavaco e no ângulo de contato ferramenta-peça. Como discutido por Deng et al. (2020) e Pleta et al. (2019), essas flutuações são inerentes ao processo e não representam instabilidade dos dados, mas sim a dinâmica natural do mecanismo de corte. Portanto, mesmo com desvios padrão altos, a comparação entre as trajetórias mantém-se válida, pois os picos e médias refletem fielmente o comportamento típico de cada estratégia.

Figura 48 – Média das componentes das forças de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $|F_z|$ ) com desvios padrão nas estratégias de fresamento trocoidal



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise das componentes da força de usinagem revela que, de maneira geral, a trajetória semielíptica horizontal (SH) sob condição a seco apresentou as maiores forças médias nas três direções, sendo especialmente destacada em  $F_y$  (68,14 N) e

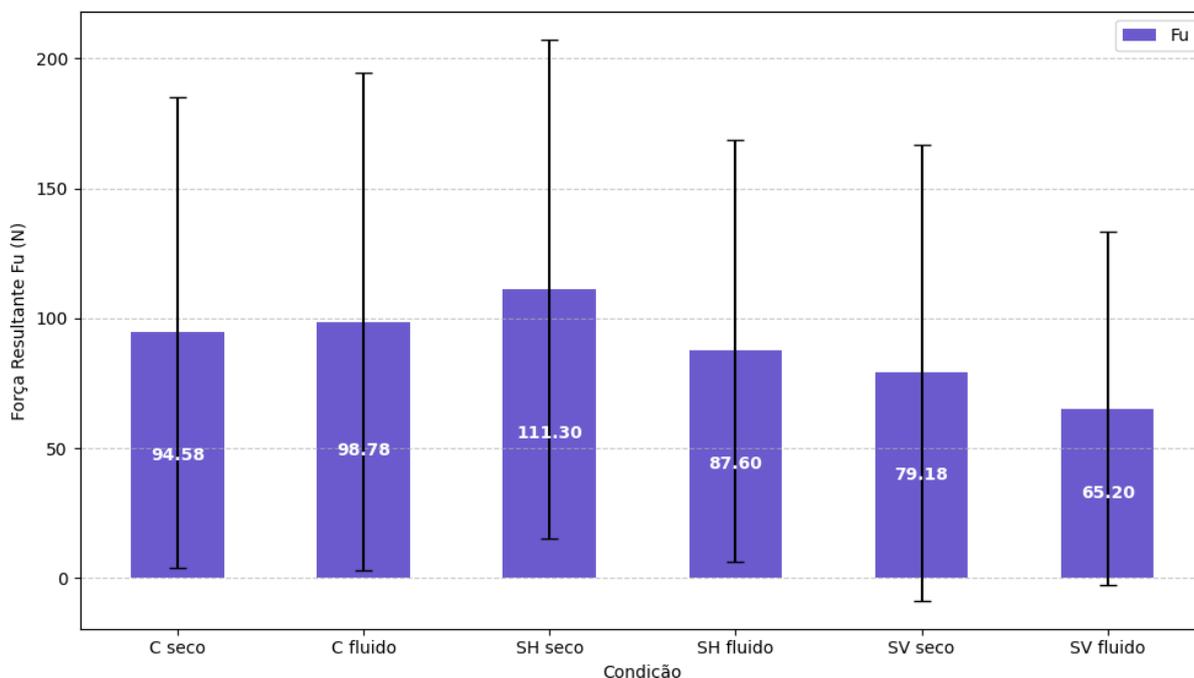
Fx (56,75 N). Este comportamento pode estar relacionado à maior quantidade de material removido por passada ou à maior solicitação lateral decorrente da geometria da trajetória.

Em contraste, a estratégia semielíptica vertical (SV) com fluido de corte resultou nas menores forças médias para Fx e Fy, indicando que a refrigeração favoreceu a redução do esforço mecânico durante a usinagem. A trajetória convencional (C) mostrou um comportamento intermediário, com forças ligeiramente superiores às da SV, mas inferiores às da SH em condição a seco.

As forças na direção Fz mantiveram-se consistentemente inferiores às demais componentes, o que é esperado no fresamento lateral, em que as forças predominantes atuam nos planos horizontais.

A Figura 49 apresenta a força de usinagem resultante  $F_u$ , calculada a partir das componentes Fx, Fy e Fz, para cada condição de usinagem testada. Os dados são expressos em termos de média e desvio padrão, permitindo comparar a severidade das condições de corte nas diferentes trajetórias e estratégias de refrigeração.

Figura 49 – Média da força resultante de usinagem ( $F_u$ ) com desvios padrão nas estratégias de fresamento trocoidal



Fonte: Autoria própria (2025)

A força resultante  $F_u$  foi mais elevada na condição SH seco, atingindo 111,30 N, o que reforça a observação de que essa trajetória exige maior esforço de corte quando não há aplicação de fluido. A segunda maior força foi observada na estratégia C fluido, com 98,78 N, sugerindo que mesmo com refrigeração, a trajetória convencional pode manter um nível elevado de solitação.

Por outro lado, a condição com menor  $F_u$  foi a SV fluido (65,20 N), evidenciando que essa combinação foi a mais favorável do ponto de vista mecânico, possivelmente devido à suavização da trajetória e à ação lubrificante do fluido. As demais condições apresentaram valores intermediários, com desvios padrão relativamente elevados, refletindo a variabilidade inerente ao processo de usinagem.

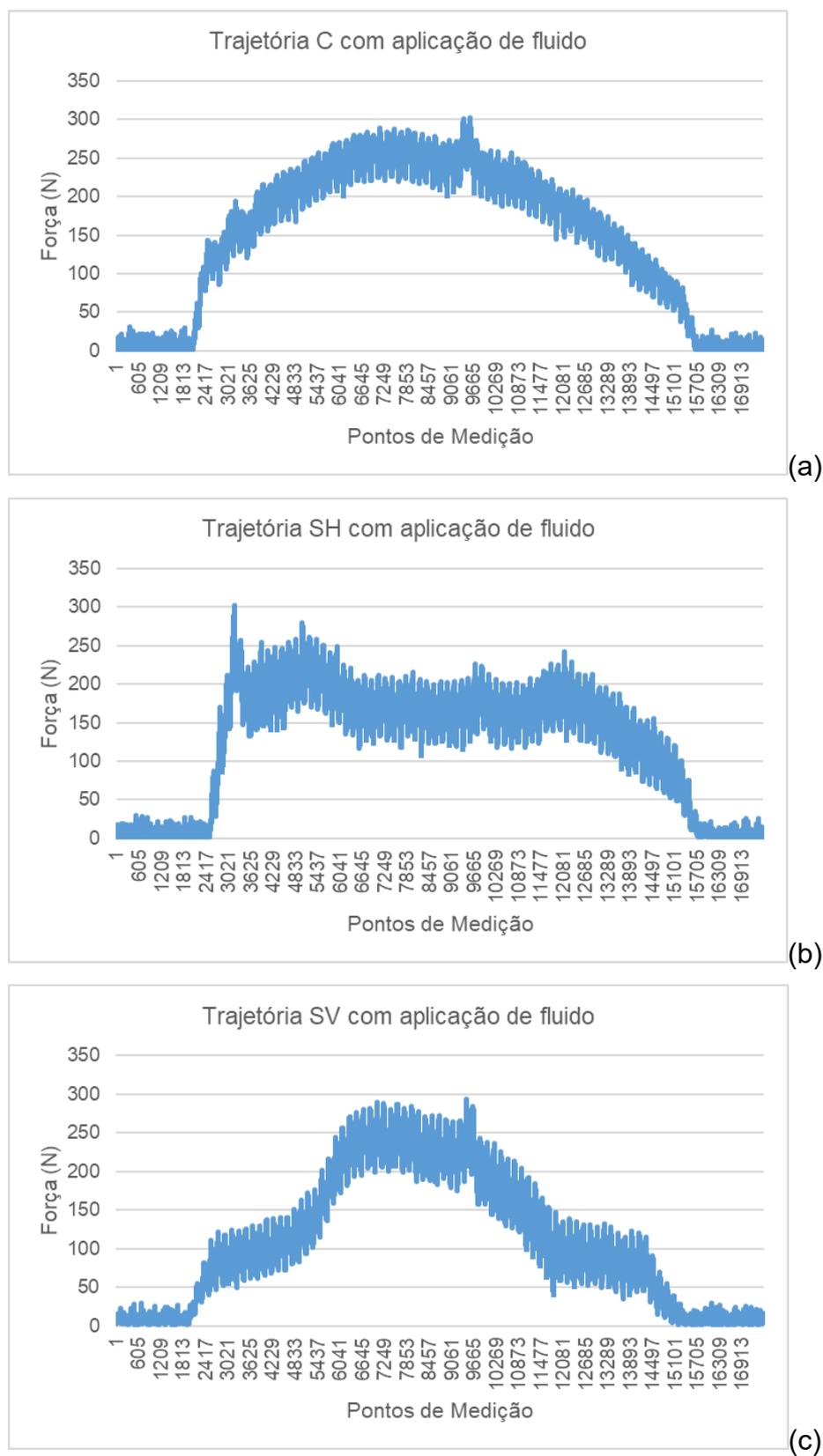
Essa distribuição reforça a importância da escolha da trajetória associada ao uso de fluido de corte na redução dos esforços durante o fresamento de materiais endurecidos.

### 5.2.3 Análise gráfica da força de usinagem

O tipo da trajetória trocoidal influencia diretamente o padrão e a magnitude da força de usinagem ao longo do processo. A Figura 50 apresenta os gráficos da força resultante de usinagem ( $F_u$ ) para as três estratégias analisadas — convencional (C), semielíptica horizontal (SH) e semielíptica vertical (SV) —, observam-se diferenças significativas no comportamento dinâmico do processo de corte em função da geometria da trajetória.

Na trajetória convencional (Figura 50.a), a força resultante apresenta uma curva com subida e descida progressivas, formando um platô entre os pontos de medição 4.000 e 12.000, no qual os valores se mantêm entre 250 e 270 N. A dispersão nesse intervalo é reduzida, com variações locais limitadas a aproximadamente  $\pm 20$  N, o que indica um processo estável em termos de carregamento mecânico. Esse comportamento é característico de movimentos circulares simétricos, como também relatado por Shixiong *et al.* (2016) em operações de desbaste, e pode ser atribuído à distribuição uniforme do engajamento da ferramenta ao longo da trajetória.

Figura 50 – Perfil da força de usinagem



Fonte: Autoria própria (2025)

A trajetória semielíptica horizontal (Figura 50.b) apresenta um comportamento diferente. Logo após o início do contato com o material (ponto ~2.000), ocorrem picos de força superiores a 300 N, seguidos por oscilações frequentes entre 200 e 270 N ao longo da faixa útil (pontos ~3.000 a ~13.000). A variabilidade é mais elevada que nas demais trajetórias, com amplitudes locais superiores a 50 N em trechos contínuos. Os picos iniciais superiores a 300 N na trajetória SH refletem transições abruptas entre segmentos retos e curvos, um fenômeno também reportado por Huang *et al.* (2020) em geometrias alongadas. A maior variabilidade ( $\approx 50$  N) sugere sensibilidade a variações de carga térmica.

Por outro lado, a trajetória semielíptica vertical (Figura 50.c) apresenta um aumento gradual da força com dois platôs distintos: o primeiro entre os pontos ~3.000 e ~6.000 (força entre 150 e 200 N) e o segundo entre ~7.000 e ~12.000 (força entre 250 e 300 N). O comportamento escalonado da força na SV (dois platôs distintos) está diretamente ligado ao aumento progressivo do envolvimento radial, conforme modelado por Huang *et al.* (2020) para cavidades profundas. A dispersão moderada ( $\pm 25$  N) indica menor sensibilidade a vibrações comparada à SH.

Comparando as estratégias, a trajetória C apresenta a menor dispersão e maior simetria no sinal, a SH apresenta os maiores picos iniciais e maior variação durante o corte, enquanto a SV possui uma progressão de força em dois níveis com média elevada. Essa análise corrobora os dados estatísticos previamente observados, nos quais a SH apresentou menor desvio padrão, mas maiores flutuações iniciais, e a SV obteve maiores valores médios e máximos de força.

### 5.3 ANÁLISE DO TEMPO DE USINAGEM

A análise comparativa das trajetórias trocoidais evidenciou diferenças significativas no tempo de usinagem entre as estratégias avaliadas, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação do tempo de usinagem entre trajetórias trocoidais

Trajatória Trocoidal	Tempo de Usinagem	Número de Trocoides	Comprimento de cada trocoide	Observações
Convencional (C)	2 min 44 s	103	≈ 31,40 mm	Referência
Semi-elíptica Horizontal (SH)	2 min 13 s	98	≈ 23,25 mm	-18,9% tempo
Semi-elíptica Vertical (SV)	3 min 16 s	109	≈ 32,26 mm	+19,5% tempo

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados temporais revelam diferenças significativas no desempenho das estratégias de usinagem analisadas. A trajetória semi-elíptica horizontal (SH) demonstrou superioridade em termos de eficiência temporal, registrando um tempo de usinagem de 2 min 13 s, o que representa uma redução de 18,9% em comparação com a trajetória convencional (C) e 32,1% em relação à semi-elíptica vertical (SV). Essa vantagem pode ser atribuída à combinação de um menor número de ciclos trocoidais (98) com um maior comprimento de trajetória por ciclo mais curto (≈23,25 mm), o que favorece movimentações mais diretas e reduz o tempo total de percurso. De acordo com Huang et al. (2020), trajetórias com maior fluidez operacional e menor complexidade geométrica reduzem a incidência de desacelerações, contribuindo para a mitigação dos tempos ociosos associados às variações de velocidade da máquina-ferramenta.

Em contraste, a trajetória semi-elíptica vertical (SV) apresentou o maior tempo de usinagem, totalizando 3 min 16 s — um aumento de 19,5% em relação à abordagem convencional (C). Esse desempenho inferior está relacionado à maior quantidade de ciclos trocoidais (109) e ao maior comprimento por ciclo (≈32,26 mm), o que, apesar de reduzir a quantidade de ciclos necessários, intensifica os efeitos das acelerações e desacelerações, resultando em maior tempo total. Conforme destacado por Akhavan Niaki et al. (2019), estratégias com deslocamentos mais extensos por ciclo podem sobrecarregar a dinâmica da máquina, elevando o tempo de processamento.

A trajetória convencional (C) posiciona-se como referência intermediária, com 2 min 44 s para 103 ciclos de aproximadamente 31,40 mm cada, apresentando um equilíbrio entre continuidade de movimento e cobertura da área de usinagem. Esses resultados evidenciam que a otimização temporal em processos trocoidais está

diretamente relacionada à relação entre o comprimento da trajetória e o número de ciclos, sendo particularmente sensível às características geométricas de cada estratégia.

#### 5.4 ANÁLISE DO TRABALHO MECÂNICO NO FRESAMENTO TROCICAL

O trabalho mecânico desenvolvido durante a usinagem representa a energia consumida pelo sistema ferramenta-máquina para remover material ao longo de um determinado percurso. Essa grandeza, obtida pela integração da força de usinagem resultante em relação ao deslocamento da ferramenta, permite uma avaliação quantitativa da eficiência do processo de usinagem. Wagih *et al.* (2023) destaca a importância da análise do trabalho mecânico em operações de fresamento trocoidal, relacionando diretamente o consumo energético com a geometria da trajetória e o desempenho global do processo.

Neste trabalho, foi realizada a avaliação do trabalho mecânico total para um único ciclo (ou trocoide completo) de usinagem em cada uma das trajetórias trocoidais estudadas — convencional (C), semielíptica horizontal (SH) e semielíptica vertical (SV). Em todas as trajetórias, a análise foi conduzida tanto para a condição de corte a seco quanto com fluido refrigerante abundante. Os dados foram obtidos na região central do canal usinado, a fim de garantir a homogeneidade do corte e evitar interferências associadas às fases de entrada ou saída da ferramenta.

A distância incremental entre amostras ( $\Delta x$ ) foi determinada pela razão entre o comprimento total percorrido pela ferramenta durante um ciclo completo da trajetória (L) e o número total de amostras adquiridas nesse intervalo (N). A força de usinagem resultante instantânea  $F_{res}(t)$  foi calculada a partir dos sinais dinâmicos das componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , coletadas durante uma volta completa da ferramenta. Com esses dados, o trabalho mecânico total foi estimado por meio da soma dos produtos entre os valores instantâneos da força resultante e os incrementos de deslocamento, conforme expresso na Equação 19.

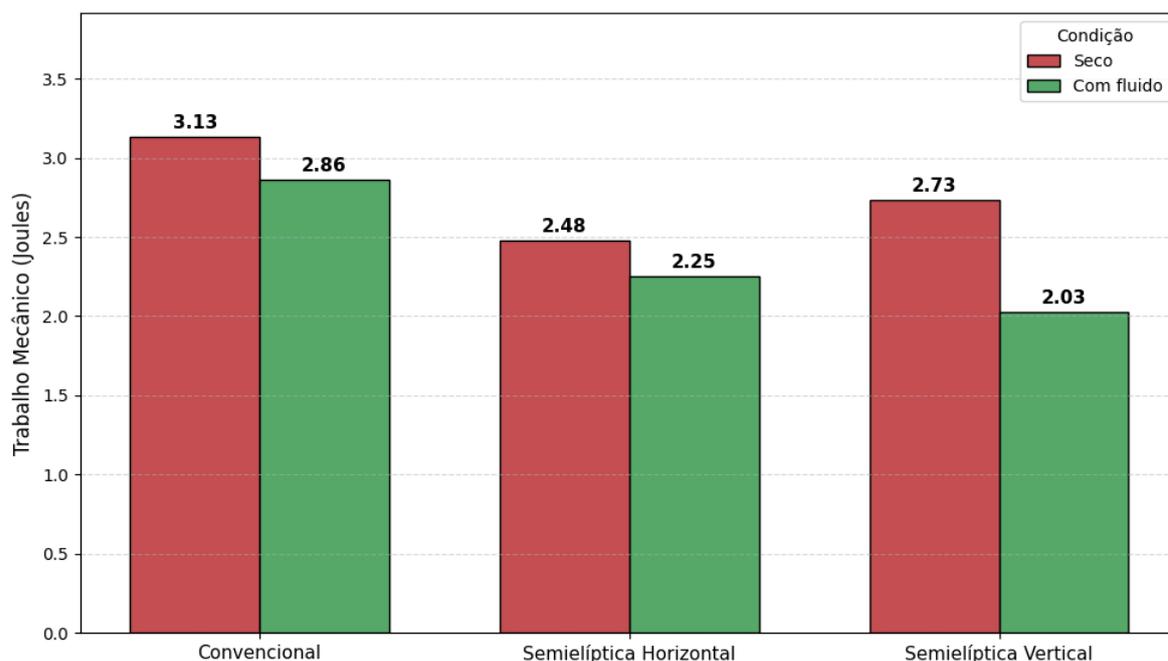
$$W = \sum_{i=1}^N F_{res}(i) \cdot \Delta x \quad (19)$$

O valor obtido expressa a energia consumida para realizar a usinagem do trecho avaliado, em N·mm, e foi convertido para Joules ( $1 \text{ J} = 1000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ) para facilitar comparações com métricas energéticas padrão. Essa abordagem permitiu a comparação direta da demanda energética entre as trajetórias e condições de refrigeração, oferecendo uma perspectiva complementar às análises baseadas apenas na força média ou no tempo de usinagem.

Embora a pressão específica de corte ( $K_s$ ) permita estimativas teóricas do trabalho mecânico via  $W = K_s \cdot A \cdot L$ , onde optou-se pela medição direta com dinamômetro devido à complexidade das trajetórias trocoidais. Comparações preliminares mostraram que o modelo baseado em  $K_s$  superestima significativamente o trabalho mecânico, estimando 68,19 J em comparação aos 2,03 J medidos experimentalmente para a trajetória semielíptica vertical (SV). Essa discrepância ocorre porque a equação teórica considera uma espessura de cavaco constante ao longo de todo o percurso da ferramenta — o que é válido para operações de fresamento linear contínuo. No entanto, em estratégias como o fresamento trocoidal, a espessura do cavaco varia continuamente ao longo da trajetória, sendo nula em trechos onde a ferramenta está apenas se reposicionando sem efetuar corte. Assim, a aplicação direta dessa fórmula em questão tende a superestimar a energia efetivamente consumida, reforçando a importância de métodos experimentais para captar os efeitos dinâmicos e intermitentes do processo.

A Figura 51 apresenta os valores de trabalho mecânico total ( $W$ ), em Joules, obtidos para a usinagem de um único ciclo de cada trajetória trocoidal avaliada, considerando ambas as condições de corte: a seco e com fluido refrigerante. Os resultados evidenciam que a trajetória semielíptica vertical (SV), na condição com fluido, apresentou o menor trabalho requerido para completar o ciclo de usinagem (2,03 Joules), indicando maior eficiência mecânica.

Figura 51 – Trabalho mecânico por trajetória e condição de refrigeração



Fonte: Autoria própria (2025)

De maneira geral, observa-se que:

- As trajetórias semiélticas (SH e SV) exigiram menos trabalho mecânico do que a trajetória convencional (C), tanto na condição a seco quanto com fluido, evidenciando maior eficiência energética dessas estratégias alternativas, ou seja, menor consumo de energia por unidade de material removido.
- A adoção de fluido de corte reduziu o trabalho mecânico nas três trajetórias analisadas, com reduções de 0,27 Joules para a trajetória convencional (de 3,13 para 2,86 J), 0,23 Joules para a semiéltica horizontal (de 2,48 para 2,25 J) e 0,70 Joules para a semiéltica vertical (de 2,73 para 2,03 J), indicando um efeito positivo da lubri-refrigeração na redução do esforço de usinagem.
- Dentre todas as combinações, a trajetória SV com fluido apresentou o menor valor absoluto de trabalho mecânico (2,03 J), sendo potencialmente a mais eficiente do ponto de vista energético.
- A trajetória convencional (C) permaneceu como a mais exigente em termos de energia, mesmo com fluido, reforçando sua menor adequação energética frente às demais estratégias.

Esses resultados corroboram a hipótese de que a geometria da trajetória influencia significativamente a demanda energética do processo, com trajetórias curvas (semielípticas) promovendo um avanço mais contínuo e suave, o que tende a reduzir os picos de força e, conseqüentemente, o trabalho total. A combinação SV com fluido mostrou o melhor desempenho energético, enquanto a trajetória C permanece menos vantajosa sob os critérios avaliados.

## 5.5 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Essa seção promove uma discussão crítica dos resultados obtidos neste trabalho, com base na avaliação comparativa das estratégias trocoidais testadas para o fresamento de canais profundos em aço AISI 4340 temperado e revenido. A análise abrange os aspectos geométricos das trajetórias, o comportamento da força de usinagem, a influência da refrigeração e o trabalho mecânico envolvido no processo, entendido aqui como a energia efetivamente despendida pela ferramenta durante a usinagem de um ciclo de trocoide.

### 5.5.1 Eficiência geométrica das trajetórias

Os dados experimentais demonstraram que a trajetória trocoidal semielíptica vertical (SV) apresentou o maior comprimento de percurso por ciclo (32,76 mm), seguida pela convencional (31,4 mm) e pela semielíptica horizontal (SH), com 23,25 mm. Essa diferença geométrica refletiu-se diretamente no tempo total de usinagem: a SV, por possuir o maior número de ciclos (109) e o maior deslocamento por trocoide, foi a estratégia menos produtiva em termos de execução do canal, apesar de apresentar vantagens em termos de suavidade e eficiência energética. Esse comportamento está alinhado com observações de Šajgalík *et al.* (2020), que relacionaram a geometria da trajetória com variações significativas nas forças de usinagem e desempenho global do processo.

Isso reforça que trajetórias mais longas geralmente implicam em maior tempo de usinagem, especialmente quando não há compensações significativas em velocidade de avanço ou profundidade de corte. No caso da SV, seu perfil mais alongado e suave favoreceu a estabilidade e a redução do trabalho mecânico, mas à

custa de um tempo de ciclo mais elevado. Assim, sua aplicação deve ser considerada com cautela em contextos onde a produtividade (tempo) for mais crítica que a eficiência mecânica ou estabilidade.

### 5.5.2 Influência da refrigeração nas forças e estabilidade

A aplicação de fluido de corte teve efeito positivo sobre todas as estratégias, promovendo reduções consistentes nas componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ), além de suavizar as oscilações durante o processo. Isso se refletiu em menores picos de força, menor variabilidade nos sinais e maior estabilidade dinâmica. Deng *et al.* (2020) destacaram que a refrigeração tem influência direta não apenas na temperatura, mas também na estabilização das forças de usinagem em trajetórias trocoidais.

No caso da trajetória semielíptica vertical (SV), a condição a seco apresentou os maiores valores de pico para as forças laterais:  $F_x$  pico = 285,20 N e  $F_y$  pico = 332,00 N, além da maior força resultante ( $F_u$  máx = 409,35 N). Esses dados indicam que a SV, quando operada sem refrigeração, é a configuração mais agressiva entre as testadas, concentrando grande intensidade de força em momentos específicos do corte — durante as fases de maior imersão no canal.

Entretanto, quando se observa a média global das forças de usinagem, percebe-se que a trajetória SH a seco foi a que apresentou os maiores valores médios entre todas as estratégias:  $F_y$  média = 68,14 N e  $F_x$  média = 56,75 N. Isso sugere que, embora os picos da SV tenham sido mais elevados, a SH manteve um nível de esforço mais alto de forma mais constante ao longo do tempo, o que pode implicar em maior carga térmica e desgaste acumulado na ferramenta. Esse comportamento está em consonância com as análises de Wagih *et al.* (2023), que associam forças médias elevadas e constantes a maior exigência energética e desgaste progressivo da ferramenta.

A aplicação de fluido de corte reduziu tanto os picos quanto as médias das forças nas três trajetórias. Os efeitos foram mais expressivos na trajetória semielíptica horizontal (SH), onde a redução dos picos de  $F_x$  e  $F_y$  chegou a aproximadamente 20% e 16%, respectivamente. Essa trajetória também apresentou os menores

desvios-padrão nas três componentes com fluido, indicando excelente estabilidade e regularidade no processo.

No caso da trajetória SV com fluido, observou-se uma redução de cerca de 14% na força resultante máxima, além de suavização dos picos e maior regularidade dos sinais. No entanto, devido à sua geometria mais profunda e verticalizada, a penetração do fluido na zona de corte pode ter sido menos eficiente, limitando o potencial de redução de forças em comparação à SH.

A trajetória convencional (C) apresentou comportamento intermediário em todas as métricas, com moderada redução das forças com o uso de fluido. Seu perfil simétrico e mais simples favoreceu um padrão de corte relativamente estável, porém com menor sensibilidade às condições de refrigeração em relação às trajetórias semielípticas.

### 5.5.3 Avaliação energética com base no trabalho mecânico

A análise do trabalho mecânico permite integrar, sob uma perspectiva energética, os efeitos combinados da trajetória da ferramenta, intensidade da força de usinagem e condições de refrigeração. A trajetória semielíptica vertical (SV) mostrou-se eficiente na dissipação do esforço devido à suavidade do movimento e apresentou menor trabalho acumulado quando refrigerada, refletindo menor intensidade acumulada de força ao longo da trajetória.

A trajetória semielíptica horizontal (SH), mesmo com deslocamentos menores por ciclo, manteve níveis elevados de força média, o que resultou em maior acúmulo de energia aplicada ao material. Esse padrão confirma as observações de Ducroux *et al.* (2019), que demonstraram que trajetórias com esforços sustentados ao longo do tempo tendem a resultar em maior trabalho acumulado, mesmo em ciclos mais curtos.

A trajetória convencional, por sua vez, combinou um padrão repetitivo de movimento com transições menos otimizadas, o que, mesmo com moderadas forças médias, implicou em maior energia dispendida por ciclo. Os resultados indicam que a eficiência energética do processo depende não apenas da magnitude das forças de usinagem, mas da forma como estas se distribuem ao longo da trajetória.

A aplicação de fluido de corte foi decisiva na redução do trabalho mecânico em todas as estratégias, com maior impacto nas trajetórias que apresentaram picos de força mais elevados ou zonas de difícil dissipação térmica. Assim, a refrigeração, aliada ao perfil geométrico da trajetória, desempenha papel fundamental na modulação da energia envolvida no processo.

#### 5.5.4 Estabilidade dinâmica do processo

A análise gráfica das forças de usinagem ao longo dos ciclos revelou padrões distintos entre as estratégias. A trajetória convencional apresentou uma curva de força com subida gradual e platô estável, refletindo seu perfil simétrico e de contato contínuo com o material. Em contrapartida, a trajetória SH apresentou oscilações mais intensas, com picos frequentes, indicando maior variabilidade e maior risco de excitação de vibrações.

Essas flutuações foram mitigadas com a refrigeração, mas permaneceram mais evidentes na SH, possivelmente devido à sua menor cobertura longitudinal e maior engajamento lateral por ciclo. Já a SV, quando refrigerada, combinou o melhor de ambos os mundos: fluidez no avanço e estabilidade no contato, resultando em menores amplitudes e menor trabalho mecânico. Este comportamento é coerente com os achados de Šajgalík *et al.* (2020), que associam variações abruptas de força à excitação de modos vibracionais instáveis, especialmente em materiais endurecidos.

#### 5.5.5 Implicações para seleção de estratégias

A análise conjunta dos resultados permite concluir que a trajetória semielíptica vertical com fluido de corte é a mais vantajosa quando o objetivo é minimizar o trabalho mecânico e estabilizar o processo, sendo especialmente adequada para canais profundos e estreitos.

A trajetória semielíptica horizontal, embora mais instável a seco, apresenta desempenho competitivo quando refrigerada, sendo recomendada para canais largos ou áreas planas. Já a trajetória convencional, embora simples e robusta, demonstrou-se menos eficiente energeticamente e menos sensível à refrigeração, limitando sua

aplicabilidade a geometrias simples com exigência menor de controle térmico e energético.

#### **5.5.6 Avaliação da estratégia semielíptica vertical sob parâmetros de corte otimizados**

Além da comparação entre estratégias sob condições padrão, esta pesquisa estendeu a análise ao desempenho da trajetória semielíptica vertical (SV) sob parâmetros de corte otimizados, com o objetivo de avaliar sua viabilidade em aplicações de usinagem com maiores solicitações térmica e mecânicas e orientadas à alta produtividade. Embora a SV tenha apresentado menor eficiência temporal nas condições convencionais, seus resultados indicaram potencial de desempenho superior quando submetida a ajustes operacionais.

Na fase complementar do estudo, manteve-se o material usinado — aço AISI 4340 com dureza de  $40 \pm 2$  HRC —, e a velocidade de corte foi elevada para 250 m/min. Essa modificação implicou no aumento dos parâmetros operacionais para 7962 rpm de rotação, 1672 mm/min de velocidade de avanço central e 3344 mm/min de velocidade de avanço periférico, resultando em melhora significativa na taxa de remoção de material e redução do tempo total de usinagem para 2 min 6 s.

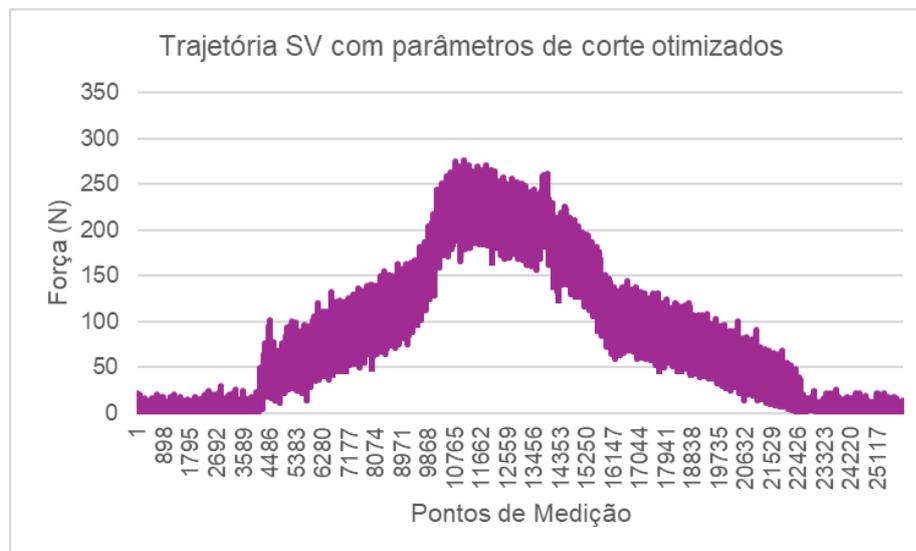
Os efeitos da otimização dos parâmetros de corte sobre a força de usinagem são apresentados de forma comparativa na Tabela 12, a qual reúne os valores de pico e as médias dos picos ( $n = 1000$  amostras) das componentes da força para a trajetória SV com fluido de corte, considerando as velocidades de 200 m/min (condição padrão) e 250 m/min (condição otimizada). Os valores da condição SV fluido a 200 m/min foram adotados como referência (100%) para o cálculo das variações percentuais. As variações entre as condições, bem como suas respectivas interpretações, permitem avaliar o impacto da otimização sobre a estabilidade do processo. O comportamento dinâmico das forças de usinagem sob condição otimizada pode ser visualizado nas Figuras 52 e 53, que ilustram, respectivamente, a evolução da força resultante ao longo do tempo e a distribuição cíclica das componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  durante a trajetória.

Tabela 12 – Comparativo entre condição padrão e condição otimizada da trajetória SV com fluido de corte

Métrica	SV Fluido (200 m/min)	SV Fluido (250 m/min) [Otimizada]	Variação (%)	Interpretação
Fx pico (N)	252	236.4	-6.2%	Redução moderada em força radial.
Fy pico (N)	302.8	279.2	-7.8%	Indicativo de maior estabilidade lateral.
Fz pico (N)	-113.2	-148.4	+31.1%	Aumento significativo na força axial.
Fx média pico (N)	222.94	219.01	-1.8%	Quase inalterado.
DP Fx (N)	3.9	3.35	-14.1%	Menor variabilidade em Fx → maior estabilidade.
Fy média pico (N)	275.93	263.32	-4.6%	Redução leve, com impacto positivo.
DP Fy (N)	3.88	2.98	-23.2%	Estabilidade significativamente melhor em Fy.
Fz média pico (N)	-89.41	-40.69	-54.5%	Queda expressiva → possível alívio na carga axial.
DP Fz (N)	3.66	5.4	+47.5%	Maior variação em Fz.
Fu máx (N)	365.83	344.9	-5.7%	Força resultante ligeiramente menor.
Fx média global (N)	25,86	22,35	-13,6%	Redução consistente na força radial média → menor solitação contínua em X.
Fy média global (N)	33,35	37,48	+12,4%	Aumento moderado na força lateral sustentada → possível intensificação do esforço transversal.
Fz média global (N)	15,57	36,21	+132,5%	Aumento expressivo na força axial média → redistribuição do esforço para o eixo Z.
Fu média global (N)	65,20	77,34	+18,6%	<i>Elevação da força resultante média → intensificação geral da carga de usinagem.</i>
W (J)	2,03	2,47	+21,7%	Aumento moderado devido à maior velocidade.

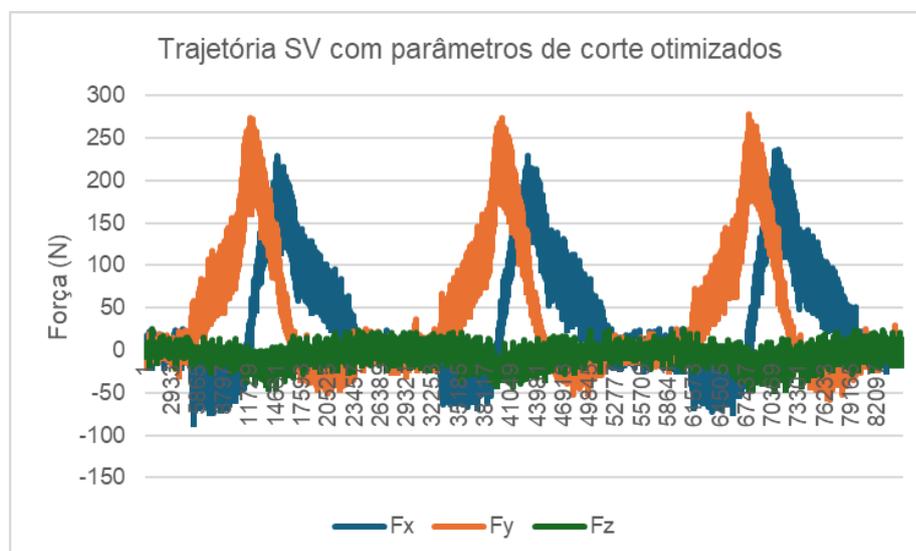
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 52 – Evolução da força resultante ao longo do tempo para a trajetória SV com parâmetros de corte otimizados ( $V_c = 250$  m/min)



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 53 – Distribuição das componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  ao longo dos ciclos trocoidais para a trajetória SV com parâmetros de corte otimizados ( $v_c = 250$  m/min).



Fonte: Autoria própria (2025)

A trajetória SV demonstrou um desempenho notável quando submetida a parâmetros otimizados de usinagem. Ao aumentar a velocidade de corte para 250 m/min, observou-se uma melhoria significativa na produtividade, com o tempo de usinagem reduzindo em 35,7% - de 3 min 16 s na condição padrão para apenas 2 min 6 s. Esta vantagem operacional, contudo, veio acompanhada de um aumento de 21,7% no trabalho mecânico, que passou de 2,03 J para 2,47 J por ciclo.

A análise das forças envolvidas revela um comportamento dinâmico particularmente interessante. A força resultante, conforme ilustrado na Figura 52, apresenta um perfil simétrico em forma de sino, com um pico de 277 N. Este padrão indica um engajamento progressivo e controlado da ferramenta com o material, mesmo nas condições mais agressivas de usinagem.

Um exame mais detalhado das componentes direcionais (Figura 53) mostra mudanças significativas na distribuição das forças: a componente radial ( $F_x$ ) apresentou uma redução média de 13,6%, a componente lateral ( $F_y$ ) registrou um aumento médio de 12,4%, e a componente axial ( $F_z$ ) mostrou o incremento mais expressivo, com 132,5% de aumento na força média

Apesar destas variações, o processo manteve excelentes indicadores de estabilidade. A variabilidade das forças laterais permaneceu controlada, com desvios padrão inferiores a 3,9 N para  $F_x$  e  $F_y$ . Além disso, a força resultante máxima foi 5,7% menor que na condição padrão, demonstrando a eficácia da otimização.

Estes resultados posicionam a trajetória SV otimizada como uma solução particularmente adequada para operações de desbaste em cavidades profundas. O ganho de produtividade (35,7% menos tempo) e o bom controle das forças laterais compensam o maior consumo energético por ciclo. Como demonstrado por Šajgalík *et al.* (2020) em estudos fundamentais sobre dinâmica de fresamento trocoidal, esta capacidade de redistribuição inteligente de cargas, onde se observa a transferência controlada de esforços das componentes radiais ( $F_x/F_y$ ) para a axial ( $F_z$ ), representa uma característica distintiva de estratégias trocoidais propriamente otimizadas.

Para aplicações práticas, recomenda-se: avaliar previamente a rigidez do sistema máquina-ferramenta, garantir condições adequadas de refrigeração e considerar o balanço entre produtividade e consumo energético conforme os requisitos específicos da operação.

Esta análise demonstra que a trajetória SV, quando adequadamente parametrizada, oferece um excelente compromisso entre velocidade, qualidade e controle processual, especialmente em operações que demandam altas taxas de remoção de material em geometrias complexas.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo desenvolver e comparar estratégias de fresamento trocoidal – convencional (C), semielíptica horizontal (SH) e semielíptica vertical (SV) – na usinagem de canais profundos em aço AISI 4340 temperado e revenido (40 HRC), sob condições de refrigeração a seco e com fluido de corte. A análise focou no desempenho das trajetórias em termos de força de usinagem, tempo de processo e trabalho mecânico por ciclo, permitindo identificar critérios objetivos para seleção de estratégias em cenários industriais.

Dentre as contribuições principais deste estudo, destacam-se:

- A trajetória SV com fluido apresentou o menor trabalho mecânico (2,03 J/ciclo), representando uma redução de 25,6% em relação à condição a seco (2,73 J/ciclo). Essa eficiência energética, aliada à estabilidade dinâmica (desvio padrão de  $F_x$  e  $F_y < 3,9$  N), torna a SV ideal para cavidades profundas, onde a dissipação de calor e a distribuição uniforme de forças são críticas, mesmo com o tempo de usinagem 47,4% superior ao da SH.
- A trajetória SH foi a estratégia mais produtiva, reduzindo o tempo de usinagem em 18,9% (133 s vs. 164 s da trajetória C) graças ao seu perfil alongado e menor número de ciclos (98). Além disso, manteve baixa variabilidade de forças (desvio padrão de  $F_x$  e  $F_y < 3,5$  N) sob refrigeração, ideal para desbastes rápidos com estabilidade.
- O uso de fluido de corte reduziu significativamente as forças de usinagem em todas as trajetórias, com quedas de 12% na SV e 20% na SH, além de minimizar oscilações (ex.: redução de 14% no DP  $F_y$  na SV otimizada). Essa melhoria na estabilidade, aliada ao controle térmico, reforça a importância da refrigeração para operações de alta eficiência, especialmente em materiais endurecidos.
- A otimização da SV para 250 m/min resultou em um aumento de 21,7% no trabalho mecânico (2,03 J  $\rightarrow$  2,47 J), mas melhorou a produtividade (tempo de usinagem reduzido de 196 s para 126 s). A redistribuição das forças ( $F_z +132,5\%$ ,  $F_x -13,6\%$ ) e a redução de 5,7% na força resultante máxima ( $F_u$ ) indicam que, embora o esforço axial tenha crescido, a

estabilidade lateral (desvio padrão de  $F_x$  e  $F_y < 3,4$  N) foi mantida, tornando a SV otimizada viável para cenários que demandam maior velocidade.

Esses resultados fornecem critérios quantitativos essenciais para a seleção otimizada dos parâmetros de usinagem em aplicações industriais, possibilitando um equilíbrio eficaz entre eficiência energética, produtividade e controle das forças na usinagem de materiais de alta resistência. De forma geral, para maximizar a produtividade, recomenda-se a adoção da trajetória semielíptica horizontal (SH), combinada com o uso de fluido de corte e avanço ajustado. Para operações que demandam maior estabilidade e minimização de esforços, a trajetória semielíptica vertical (SV), associada a fluido de corte e velocidade de corte elevada, mostra-se mais adequada. Já a trajetória convencional (C) permanece como uma alternativa robusta para geometrias simples, embora com desempenho relativamente inferior.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar das contribuições relevantes, o presente estudo possui limitações. A análise foi restrita a um único material (AISI 4340) e não incluiu a avaliação do desgaste da ferramenta em regimes prolongados de usinagem. Fatores como diferentes revestimentos de ferramentas, estratégias alternativas de refrigeração (como MQL ou criogênica) e a integridade superficial das peças não foram explorados, representando oportunidades valiosas para pesquisas futuras.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) Estender a metodologia a outros materiais de difícil usinagem, como ligas de titânio ou superligas à base de níquel.
- b) Investigar o efeito de revestimentos avançados de ferramentas na vida útil e estabilidade do processo.
- c) Explorar estratégias híbridas de trajetórias, combinando os benefícios das abordagens SV e SH para otimizar simultaneamente produtividade e qualidade superficial.
- d) Avaliar a integridade superficial e tensões residuais geradas por cada trajetória, complementando a análise de forças.

## REFERÊNCIAS

- AKHAVAN NIAKI, F., PLETA, A., MEARS, L. et al. Trochoidal milling: investigation of dynamic stability and time domain simulation in an alternative path planning strategy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.102, p. 1405–1419, 2019.
- ASME. **Manual on cutting of metals** (Part III Chap 1), 2nd. New York: ASME, 1952.
- CHAKRABORTY, P.; ASFOUR, S.; CHO, S.; ONAR, A.; LYNN, M. Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 205, p. 190-202, 2018.
- DENG, Q.; CHEN, Z.; CHANG, Z.; SHEN, R.; ZHOU, Y. A model for investigating the temperature of trochoidal machining. **Journal of Industrial and Production Engineering**. v. 37, n.4, p. 194-203, 2020.
- DOGU, Y.; ASLAN, E.; CAMUSCU, N. A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 1, p. 1-9, 2006.
- DOS SANTOS, A.J., DE OLIVEIRA, D.A., PEREIRA, N.F.S. et al. Effect of conventional and trochoidal milling paths on burr formation during micromilling of grade 4 commercially pure titanium. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 49, p.1727-1742, 2024.
- DUCROUX, E.; PRAT, D.; VIPREY, F.; FROMENTIN, G.; D'ACUNTO, A. Analysis and modelling of trochoidal milling in Inconel 718. **Procedia CIRP** 82. p. 473–478, 2019.
- EVANS, Ken. Programming of CNC machining center in absolute and incremental systems. In: **Programming of CNC Machines**, Third Edition. New York: Industrial Press Inc., 2007.
- FAHAD, M. **A hear partition investigation of multilayer coated carbide tools for high speed machining through experimental studies and finite element modelling**. 2012. 187 pp. Tese (Doutorado) – The University of Manchester. Manchester, UK.
- FITZPATRICK, Michael. **Machining and CNC Technology**. 3 ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2014.
- HUANG, X.; WU, S.; LIANG, L.; LI, X. HUANG, N. Efficient trochoidal milling based on medial axis transformation and inscribed ellipse. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.111, n.1, p.1069-1076, 2020.
- IBARAKI, S.; YAMAJI, I.; MATSUBARA, A. On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving. **Precision Engineering**, v. 34, p. 467-473, 2010.

ISCAR TOOL. **EC-H7 10-20C10CFR.5M72 solid mill catalog**. Disponível em: <<https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3313783&fnum=3643&mapp=ML&GFSTYP=M&srch=1>>. Acesso em: 07 jan. 2021.

JOHNSON, Spencer. **Quem mexeu no meu Queijo?**. 1ª ed. Tradução de Maria Clara de Biase. Rio de Janeiro: Record, 2000.

KOZOVÝ P, ŠAJGALÍK M, HOLUBJÁK J, JOCH R, DRBÚL M. Influence of trochoidal milling parameters on tool load. **Transportation Research Procedia**. v.74, p.709-716, 2023.

LI, Z.; CHENG, L.; XU, K.; GAO, Y.; TANG, K. Five-axis Trochoidal Flank Milling of Deep 3D Cavities. **Computer-Aided Design**. v. 119, 2020.

LOCKYER, Peter Stephen. **Controlling the interpolation of NURBS Curves and Surfaces**. 2006. 211 pp. Tese (Doutorado) – The University of Birmingham. Manchester, UK.

LUO, M.; HAH, C.; HAFEEZ, M. Four-axis trochoidal toolpath planning for rough milling of aero-engine blisks. **Chinese Journal of Aeronautics**. v. 32, n.8, p. 2009-2016, 2019.

NIAKI, F.; PLETA, A.; MEARS, L. Trochoidal milling: investigation of a new approach on uncut chip thickness modeling and cutting force simulation in an alternative path planning strategy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 97, p. 641-656, 2018.

OTKUR, M.; LAZOGLU, I. Trochoidal milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.47, n.1, p.1324-1332, 2007.

PASCHOAL, Marina Macedo. **Fresamento trocoidal: programação de trajetórias trocoidais e avaliação da precisão**. 2021. 69 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, 2021.

PLETA, A.; ULUTAN, D.; MEARS, L. An investigation of alternative path planning strategies for machining of nickel-based superalloys. **Procedia Manufacturing**. v.1, n.1, p.556-566, 2015.

PLETA, A.; MEARS, L. Cutting force investigation of trochoidal milling on nickel-based superalloy. **Procedia Manufacturing**. v.5, n.1, p.1348-1356, 2016.

PLETA, A.; NIAKI, F.A.; MEARS, L. Investigation of chip thickness and force modelling of trochoidal milling. **Procedia Manufacturing**. v.10, n.1, p. 612 – 621, 2017.

PLETA, A.; NIAKI, F.; MEARS, L. A comparative study on the cutting force coefficient identification between trochoidal and slot milling. **Procedia Manufacturing**. v. 26, p. 570-579, 2018.

PLETA, A.; NITHYANAND, G.; NIAKI, F.; MEARS, L. Identification of optimal machining parameters in trochoidal milling of Inconel 718 for minimal force and tool

wear and investigation of corresponding effects on machining affected zone depth. **Journal of Manufacturing Processes**. v.43, p. 54-62, 2019.

POLISHETTY, A.; GOLDBERG, M.; LITTLEFAIR, G.; PUTTURAJU, M.; PATIL, P.; KALRA, A. A preliminary assessment of machinability of titanium alloy Ti-6Al-4V during thin wall machining using trochoidal milling. **Procedia Engineering**. v.97, n.1, p.357-364, 2014.

PUSAVEC, F.; KENDRA, T.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 45–56, 2014.

RAUCH, M.; DUC, E.; HASCOET, J.Y. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.49, n.1, p.375–383, 2009.

ŠAJGALÍK, M. *et al.* Analysis and Prediction of the Machining Force Depending on the Parameters of Trochoidal Milling of Hardened Steel. **Applied Sciences**. v.10, n.1788, p.1-19, 2020.

SALEHI, M.; BLUM, M.; FATH, B.; AKYOL, T.; HAAS, R., OVTCHAROVA, J. Epicycloidal versus trochoidal milling- Comparison of cutting force, tool tip vibration, and machining cycle time. **Procedia CIRP**, v. 46, n. 7, p.230-233, 2016.

SANDVIK COROMANT. **Métodos de fresamento de retoque: fresamento trocoidal**. Disponível em: <[http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/application\\_overview/holes\\_and\\_cavities/slicing\\_methods](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/slicing_methods)>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SECO TOOLS. **Catalogue & Technical Guide April 2016: Solid End Mills**. 2016. Disponível em: <[https://www.qualitymill.com/ASSETS/DOCUMENTS/ITEMS/EN/JABRO\\_58915\\_Catalog.pdf](https://www.qualitymill.com/ASSETS/DOCUMENTS/ITEMS/EN/JABRO_58915_Catalog.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2020.

SHAHL AM, AGARWAL A, MEARS L. Tool wear area estimation through in-process edge force coefficient in trochoidal milling of Inconel 718. **Manuf Lett.**; v.35, p.391-398, 2023.

SHIXIONG, W.; WEI, M.; BIN, L.; CHENGYONG, W. Trochoidal machining for the high-speed milling of pockets. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 233, n. 1, p. 29-43, 2016.

SHOKRANI, A.; DADKHAH, M.; DOLATABADI, A. An overview of cutting fluids application in machining processes: benefits and limitations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 1-15, 2012.

SIEMENS. **SINUMERIK 840D sl/828D preparação do trabalho**: Manual de programação. Nürnberg: Siemens AG, 2010.

SINGH R., BAJPAI V. Coolant and Lubrication in Machining. In: Nee A. (eds) **Handbook of Manufacturing Engineering and Technology**., London: Springer, 2015

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 7 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

SUH, S. H. KANG, S. K. CHUNG, D. H. STROUD, I. **Theory and Design of CNC Systems**. **Springer Series in Advanced Manufacturing**. London: Springer, 2008.

TANG, L.; ZHANG, Y.; LI, C.; ZHOU, Z.; NIE, X.; CHEN, Y.; CAO, H.; LIU, B.; ZHANG, N.; SAID, Z.; DEBNATH, S.; JAMIL, M.; ALI, H. M.; SHARMA, S. Biological stability of water-based cutting fluids: progress and application. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 35, art. 3, 2022.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4<sup>th</sup> Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TRINDADE, Kaciê Karoline de Araújo. **Desenvolvimento e avaliação de estratégias trocoidais para o fresamento do aço AISI 4340 temperado e revenido**. 2018. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

UHLMANN, E.; REINKOBER, S.; HOFFMANN, M.; KÄPERNICK, P. Trochoid milling with industrial robots. **Procedia Manufacturing**. v.43, n.1, p.447-454, 2020.

ULUTAN, Durul; ÖZEL, Tugrul. **Hard Machining**. In: Modern Manufacturing Process. Chapter 13. p. 309 – 321, 2020.

VOLOSOVA, M.; FYODOROV, S.; OPLESHIN, S.; MOSYANOV, M. Wear Resistance and Titanium Adhesion of Cathodic Arc Deposited Multi-Component Coatings for Carbide End Mills at the Trochoidal Milling of Titanium Alloy. **Technologies**. v.8, n.38, p.1-19, 2020.

WAGIH, M., HASSAN, M. A., EL-HOFY, H., YAN, J., MAHER, I. Effects of process parameters on cutting forces, material removal rate, and specific energy in trochoidal milling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**. v.238, n.7, 2023.

WANG, Q.; LIAO, Z.; ZHENG, Y.; LI, J.; ZHOU, X. Removal of critical regions by radius-varying trochoidal milling with constant cutting forces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 98, p. 671-685, 2018.

WANG, Y.; REN, Y.; YAN, P.; LI, S.; DAI, Z.; JIAO, L.; ZHAO, B.; PANG, S.; WANG, X. The effect of cutting fluid on machined surface integrity of ultra-high-strength steel 45CrNiMoVA. **Materials**, v. 16, n. 9, p. 3331, 2023.

WASZCZUK, K.; KAROLCZAK, P.; WIŚNIEWSKA, M.; KOWALSKI, M. Influence of the path type on selected technological effects in the trochoidal milling. **Advances in Science and Technology Research Journal**. v. 11, n.1, p. 147-153, 2017.

WASZCZUK, K.; SKOWRONEK, H.; KAROLCZAK, P.; KOWALSKI, M.; KOŁODZIEJ, M. Influence of the Trochoidal Tool Path on Quality Surface of Groove Walls. **Advances in Science and Technology Research Journal**. v.13, n.1, p. 38-42, 2019.

WASZCZUK M. Influence of the Trochoidal Tool Path Generation Method on the Milling Process Efficiency. **Advances in Science and Technology Research Journal**. v.14, n.3, p. 199-203, 2020.

WU, B.; ZHENG, C.; LUO, M.; HE, X. Investigation of trochoidal milling nickel-based superalloy. **Materials Science Forum**. v. 723, p. 332-336, 2012.

YG1. YG-1 Expands Product Line with "Chip Splitter" Type in V7 Plus Carbide End Mills. Disponível em: < [https://www.yg1.kr/newsnmedia/pressroom\\_view.asp?idx=2761](https://www.yg1.kr/newsnmedia/pressroom_view.asp?idx=2761)>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ZAGÓRSKI, I.; KULISZ, M.; KŁONICA, M.; MATUSZAK, J. Trochoidal Milling and Neural Networks Simulation of Magnesium Alloys. **Materials**. v.12, n.2070, p.1-25, 2019.