

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

MAURO MASSIGNANI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FIXAÇÃO E DA VIBRAÇÃO NO DESGATE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO**

CAXIAS DO SUL

2025

MAURO MASSIGNANI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FIXAÇÃO E DA VIBRAÇÃO NO DESGATE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Eng^o Rodrigo P. Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2025

MAURO MASSIGNANI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FIXAÇÃO E DA VIBRAÇÃO NO DESGASTE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Eng^o Rodrigo P. Zeilmann

Aprovado em Clique ou toque aqui para inserir uma data.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng^o. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Eng^o. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul

Me. Eng^o. Samuel Inácio Velho
Universidade de Caxias do Sul

"Este trabalho é dedicado à minha família — pais e irmãos — e, em especial, à minha esposa, Eliane do Prado de Oliveira, e às minhas filhas, Stefany e Natália Oliveira da Silva. A elas, meu profundo agradecimento pela compreensão e apoio durante todos esses anos de estudos."

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido saúde, sabedoria, força e perseverança ao longo dessa longa caminhada acadêmica.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Eng^o. Rodrigo Panosso Zeilmann, pelo apoio, orientação e dedicação ao longo desta jornada. Sua expertise, profissionalismo e comprometimento foram essenciais para a realização deste trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Sr. Vilmar Francisquetti, da empresa TecnoSuporte, e ao Eng^o. Vinicius Brigolini, que me proporcionaram a valiosa oportunidade de realizar meu estágio em sua empresa.

Meus agradecimentos também à equipe de manutenção da empresa Suspensys: ao Eng^o. Fernando Frosi e aos técnicos de automação Srs. Rodrigo Moreira e Rodrigo Lima, que intermediaram o contato com Marcelo Luiz, representante da Tractian, fornecedor dos sensores para a análise de vibração.

À empresa TecniLey, em especial ao Sr. Leandro Leyser, expressei minha sincera gratidão pelo fornecimento do acelerômetro, essencial para a análise de balanceamento realizada neste trabalho.

Agradeço ao Sr. Eng^o. Rudimar Demore, da empresa Aços e Peças Demore, por disponibilizar seu parque fabril para a execução deste trabalho. Estendo meu agradecimento especial ao gerente e Eng^o. Rodrigo Vergani, assim como ao técnico de laboratório Sr. Anderson Motter.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência.”*

Henry Ford

RESUMO

Este estudo investiga a influência do sistema de fixação no desgaste de ferramentas de corte em operações de fresamento, comparando o porta-piça e hidráulico. Embora o porta-piça seja mais econômico e amplamente utilizado, apresenta limitações quanto ao desbalanceamento, excentricidade e vibrações, comprometendo a precisão e a vida útil da ferramenta. Em contraste, o hidráulico proporciona maior estabilidade e precisão, apesar do custo mais elevado. O trabalho aborda diversos tipos de desgaste, como o desgaste por flanco e por entalhe, além de avarias severas como trincas e lascamentos, que impactam diretamente o desempenho da produção. São analisados os mecanismos de desgaste por adesão, abrasão, difusão e oxidação, que atuam de forma específica sobre os materiais da ferramenta e da peça. A curva de vida útil da ferramenta é avaliada pela medição do desgaste por flanco (VB), um indicador essencial de durabilidade. Além disso, o estudo examina como os sistemas de fixação influenciam o desbalanceamento, a excentricidade e as vibrações, resultando em desgastes irregulares. Conclui-se que a escolha adequada do sistema de fixação, aliada ao controle rigoroso dos parâmetros de usinagem, é fundamental para otimizar a vida útil da ferramenta e a eficiência do processo.

Palavras-chave: Desgaste; Excentricidade; Ferramenta; Fixação; Fresamento.

ABSTRACT

This study investigates the influence of the tool holding system on tool wear in milling operations, comparing collet and hydraulic adapters. While the collet holder is more economical and widely used, it has limitations regarding imbalance, runout, and vibrations, which compromise precision and tool life. In contrast, the hydraulic holder offers greater stability and accuracy, despite its higher cost. The study addresses various types of wear, such as flank and notch wear, as well as severe damages like cracks and chipping, which directly affect production performance. It analyzes wear mechanisms including adhesion, abrasion, diffusion, and oxidation, which act specifically on the materials of both the tool and the workpiece. Tool life is assessed through flank wear (VB), a key durability indicator. Furthermore, the research examines how the holding systems influence imbalance, runout, and vibrations, resulting in irregular wear patterns. It concludes that the proper choice of tool holding system, combined with strict control of machining parameters, is essential to optimize tool life and process efficiency.

Keywords: Wear; Runout; Tool; Clamping; Milling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação.....	17
Figura 2 – Centro de usinagem.....	20
Figura 3 – Fresamento discordante.....	21
Figura 4 – Fresamento concordante.....	22
Figura 5 – Fresa de topo	22
Figura 6 – Formação do corte.....	23
Figura 7 – Formação do cavaco.....	24
Figura 8 – Sistemas de fixação	25
Figura 9 – Sistema interno porta-pinça	26
Figura 10 – Sistema interno hidráulico	27
Figura 11 – Desgaste de flanco	28
Figura 12 – Desgaste de entalhe	29
Figura 13 – Principais mecanismos causadores de desgaste	31
Figura 14 – Curva de comportamento de desgaste.....	32
Figura 15 – Desbalanceamento da ferramenta	33
Figura 16 – Excentricidade da ferramenta.....	34
Figura 17 – Gráfico de vida útil x excentricidade	35
Figura 18 – Vibração na ferramenta.....	36
Figura 19 – Fluxograma das etapas	38
Figura 20 – Especificação do sistema de fixação.....	39
Figura 21 – Ferramenta de corte.....	39
Figura 22 – Relógio apalpador	40
Figura 23 – Medição da excentricidade.....	40
Figura 24 – Balanceador NK600	41
Figura 25 – Posições do balanceador	41
Figura 26 – Centro de usinagem Doosan	42
Figura 27 – Corpo de prova.....	43
Figura 28 – Equipamento de medição Tesa.....	44
Figura 29 – Sensor de vibração Traction.....	44
Figura 30 – <i>Software Analytics</i>	45
Figura 31 – Posições dos sensores.....	45
Figura 32 – Fixação do corpo de prova	46
Figura 33 – Estratégia de usinagem.....	46

Figura 34 – Gráfico do desgaste	50
Figura 35 – Desgaste de flanco (VB)	53
Figura 36 – Desgaste de flanco máximo (VBmax)	54
Figura 37 – Desgaste de entalhe	54
Figura 38 – Desgaste por lascamento	55
Figura 39 – Desgaste por adesão	55
Figura 40 – Desgaste por abrasão.....	56
Figura 41 – Desgaste por oxidação.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do fresamento.....	43
Tabela 2 – Medição do desgaste de flanco (VB).....	49
Tabela 3 – Comprimento interpolado.....	50
Tabela 4 – Valores do balanceamento.....	51
Tabela 5 – Resultados das excentricidades	52
Tabela 6 – Dados RMS de velocidade e aceleração da vibração	52
Tabela 7 – Comparativo entre os sistemas de fixação.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS

Vc	Velocidade de corte
Fz	Avanço de corte
Ap	Profundidade de corte
Ae	Largura de corte
h	Espessura de corte antes da retirada de cavaco
h _{ch}	Espessura de corte após a retirada de cavaco
VB	Desgaste de flanco
VB _{max}	Desgaste de flanco máximo
mm	Milímetro
rpm	Rotação por minuto
g	Unidade de aceleração (aceleração da gravidade padrão, 1 g = 9,81 m/s ²)
mm/s	Unidade de velocidade de vibração (milímetro por segundo)
m/s ²	Unidade de aceleração no Sistema Internacional (SI)
m/min	Metros por minutos
mm/rot	Milímetros por rotação
µm	Micrometro

LISTA DE SIGLAS

UCS	Universidade de Caxias do Sul
TIR	<i>Total Indicated Runout</i> (Distância entre a posição máxima e a mínima radial da ferramenta).
<i>Runout</i>	Diferença do eixo rotacional da ferramenta com o eixo fuso da máquina
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e do Aço)
HP	<i>Horsepower</i> (Unidade de medida de potência)
HR _c	<i>Hardness Rockwell Scale C</i> (Escala de Dureza Rockwell C)
Wi-fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Conexão de dispositivos à internet sem o uso de cabos)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz quadrada da média dos quadrados)

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Ângulo de cunha
γ	Ângulo de Saída da ferramenta
α	Ângulo de incidência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	FRESAMENTO	20
2.1.1	Fresa de Topo	22
2.1.2	Mecânica da formação do Cavaco.....	23
2.2	SISTEMAS DE FIXAÇÃO	25
2.2.1	Sistema de fixação porta-pinça	26
2.2.2	Sistema de fixação hidráulico	27
2.3	TIPOS DE DESGASTE.....	28
2.3.1	Desgastes	28
2.3.2	Avarias	29
2.3.3	Mecanismo Causadores do Desgaste da Ferramenta	30
2.3.4	Vida da Ferramenta.....	32
2.4	INFLUÊNCIAS NO SISTEMA DE FIXAÇÃO	33
2.4.1	Desbalanceamento.....	33
2.4.2	Excentricidade.....	33
2.4.3	Vibração.....	35
3	METODOLOGIA	38
3.1	VARIÁVEIS DE ENTRADA.....	38
3.1.1	Análise dos sistemas de fixações	38
3.1.2	Seleção da ferramenta	39
3.1.3	Avaliação da excentricidade.....	40
3.1.4	Medição do Balanceamento	41
3.2	ITENS FIXOS DO PROCESSO.....	42
3.2.1	Máquina	42
3.2.2	Corpo de Prova	42
3.2.3	Parâmetros de Corte.....	43
3.2.4	Equipamento de medição	43

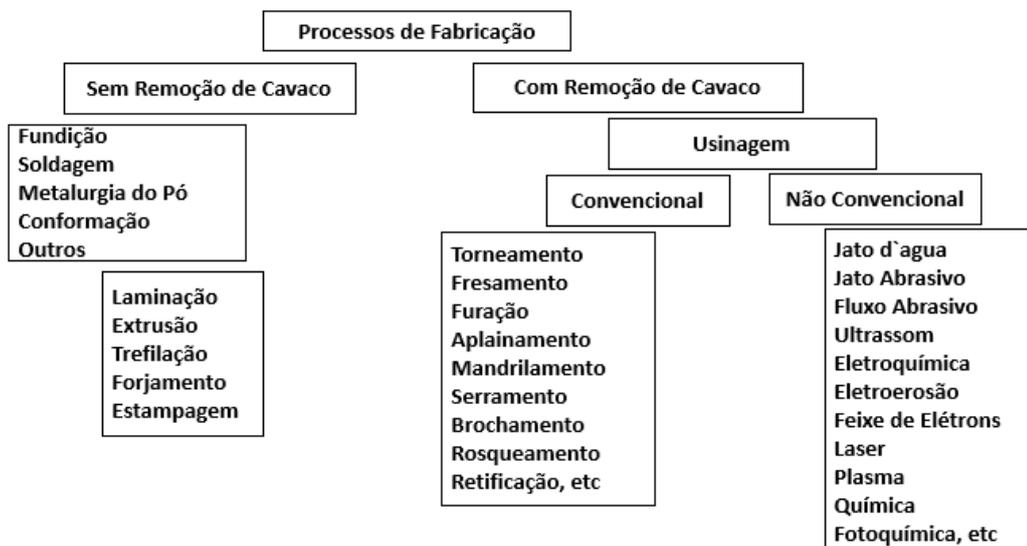
3.2.5	Sensores de vibração.....	44
3.3	PLANEJAMENTO DE USINAGEM	45
3.4	VARIÁVEIS DE SAÍDA	47
4	RESULTADOS	48
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE FIXAÇÃO.....	48
4.2	ANÁLISE DO DESGASTE E DA VIDA	49
4.2.1	Comprimento do desgaste e vida.....	49
4.2.2	Tipos e mecanismos de desgaste	53
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5	CONCLUSÃO	58
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

Até o século XVII, as peças de engenharia eram majoritariamente feitas de madeira e trabalhadas com ferramentas de aço-carbono, com algumas exceções. Com a Revolução Industrial, o desenvolvimento de materiais mais duráveis impulsionou o uso de aços-liga nas ferramentas de corte. No final do século XVIII e início do XIX, a introdução da energia a vapor e hidráulica proporcionou um avanço significativo na indústria metalúrgica, levando ao surgimento de máquinas-ferramenta essenciais para a produção de uma variedade de equipamentos. Em 1774, John Wilkinson criou uma máquina para mandrilar cilindros de motores a vapor, enquanto em 1797 Henry Maudslay introduziu o primeiro torno com avanço automático, e, nas décadas seguintes, novas máquinas, como a plainadora (1860) e a fresadora universal (1862), foram desenvolvidas por J. R. Brown (MACHADO et al., 2015).

A produção de peças e utensílios são utilizados diversos processos de fabricação que transformam a matéria-prima em produtos acabados. Esses processos podem ser classificados em dois tipos principais (Figura 1): aqueles que alteram a forma da matéria-prima e os que mantêm a forma, mas modificam propriedades específicas, como rigidez ou dureza. Entre os processos que mantêm a forma estão os tratamentos térmicos e de superfície, enquanto os que alteram a forma incluem a soldagem, que aumenta a massa, a conformação, que conserva a massa por meio de matrizes, e a usinagem, que reduz a massa ao remover material com a ação de uma ferramenta (FRACARO, 2017).

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

A usinagem é um processo de fabricação convencional utilizado para transformar matéria-prima em peças acabadas. O torneamento e o fresamento são essenciais para a indústria moderna devido à sua capacidade de produzir componentes com alta precisão e qualidade. Para que ocorra a transformação da peça bruta para a peça finalizada, é necessária a ação de uma ferramenta, que, embora seja obrigatoriamente mais dura que o material da peça, sofre desgaste devido às várias repetições necessárias para moldar o produto final.

O desempenho das operações de usinagem é impactado por diversos fatores, entre os quais o desgaste é um dos mais comuns. Esse desgaste pode afetar diretamente o custo final das peças, pois quanto maior o número de ferramentas utilizadas no processo, maior será o valor agregado a elas. A qualidade das ferramentas de corte é fundamental, pois elas precisam ser capazes de suportar o desgaste causado durante a execução das operações de usinagem.

Compreender os mecanismos de desgaste e aplicar estratégias adequadas são passos essenciais para aprimorar os processos de usinagem. A forma como as ferramentas são fixadas e o tipo de suporte utilizado desempenham um papel crucial nesse contexto, influenciando diretamente a durabilidade das ferramentas, a estabilidade do processo e a qualidade das peças produzidas. A escolha do sistema de fixação impacta significativamente a eficiência da usinagem, pois sistemas inadequados podem gerar vibrações e desalinhamentos, aumentando o desgaste e comprometendo o desempenho do processo. Apesar de sua importância, é pouco explorada, evidenciando a necessidade de estudos mais aprofundados para compreender como diferentes métodos de fixação afetam o desempenho das ferramentas e a qualidade das operações.

1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância desta pesquisa é reforçada pela necessidade crescente de aprimorar os processos de usinagem e reduzir os custos operacionais na indústria. Ao oferecer uma análise sobre o efeito da fixação na durabilidade das ferramentas, o estudo contribuirá para o uso mais eficaz dos métodos de fixação, resultando em maior durabilidade das ferramentas, precisão na fabricação de peças e economia nos custos de produção.

Para Thorenz, et al. (2018), a fixação da ferramenta pode provocar desgastes irregulares e prematuros, afetando diretamente a precisão das peças e a eficiência do processo. Apesar da importância desse problema, existe uma limitação considerável na compreensão sobre como diferentes métodos de fixação impactam no desgaste das ferramentas. Este estudo visa

preencher essa necessidade ao investigar a influência do sistema de fixação no desgaste e na vida útil das ferramentas, bem como na qualidade e precisão das peças produzidas.

Além disso, os resultados desta pesquisa têm o potencial de incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas mais eficientes na área de usinagem, beneficiando tanto a indústria quanto a academia. Assim, a escolha deste tema se justifica por sua importância prática e acadêmica, proporcionando contribuições significativas para o avanço do conhecimento nos processos de usinagem.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar a influência dos sistemas de fixação hidráulica e porta-pinça no desgaste das ferramentas de corte durante operações de fresamento. A partir dessa análise, busca-se identificar o método de fixação que oferece maior eficiência e durabilidade.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência do sistema de fixação e das vibrações no desgaste da ferramenta em processos de fresamento.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar as características dos sistemas de fixação hidráulica e com porta-pinça.
- b) Avaliar e comparar os tipos de desgaste da ferramenta em cada sistema de fixação.
- c) Examinar e comparar os mecanismos de desgaste da ferramenta em cada sistema de fixação.
- d) Medir os níveis de vibrações gerados por cada sistema de fixação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a elaboração da fundamentação teórica que serviu como base para a realização deste trabalho. Serão abordados conceitos relacionados ao fresamento, sistema de fixação, desgaste e seus mecanismos, vida da ferramenta e influência da fixação sobre o desgaste.

2.1 FRESAMENTO

O fresamento é um processo mecânico de usinagem, é utilizado uma máquina chamada fresadora, atualmente pode ser executado em centro de usinagem (Figura 2), onde a ferramenta gira para efetuar o corte, a peça é devidamente presa em uma morsa, sistema mais comum de fixação de peças em fresadoras ou demais dispositivos adequados e apropriados para fixação das peças (BARRIOS; PIVETTA; YOSHIKAMA, 2011).

Figura 2 – Centro de usinagem



Fonte: Adaptado de Dmg Mori (2024)

O fresamento pode ser classificado de acordo com a orientação do eixo-árvore da ferramenta. No fresamento vertical, a ferramenta é montada em um eixo na posição vertical. Já no fresamento horizontal, a ferramenta é montada na posição horizontal, facilitando o

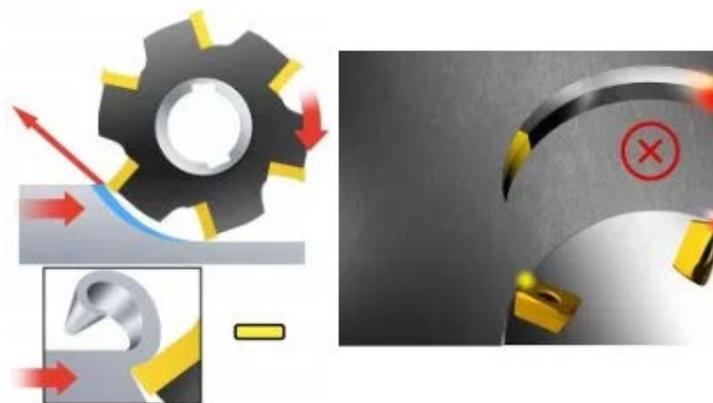
escoamento do cavaco. A escolha entre os dois tipos de fresamento depende da natureza da peça e do tipo de usinagem a ser realizada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A usinagem é feita por uma ferramenta de corte feita de um material mais duro que o material da peça a ser usinada. O material removido da peça é obtido pelo movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça. O movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho resulta no corte de uma limalha de material da peça de trabalho, reduzindo a espessura da peça. A limalha do material cortado da peça é chamado de cavaco. Deve ser entendido que os cavacos são produzidos por ação de cisalhamento e não cortando (GUPTA; MITTAL, 2009).

Levando em consideração o movimento de avanço e de rotação da ferramenta, distinguem-se dois tipos de movimento de usinagem: discordante e concordante entre peça e ferramenta (BARRIOS, PIVETTA, YOSHIKAMA, 2011).

No fresamento discordante (Figura 3), os sentidos do avanço e do movimento de corte são contrários. Nesse processo, a aresta de corte da ferramenta penetra na peça com uma espessura de corte inicial nula, que aumenta gradativamente até atingir o valor máximo correspondente à largura de corte. Como resultado, a ferramenta está sujeita a elevados esforços, o que pode gerar vibrações indesejadas. Essas vibrações podem comprometer tanto o acabamento superficial quanto a precisão dimensional da peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 3 – Fresamento discordante

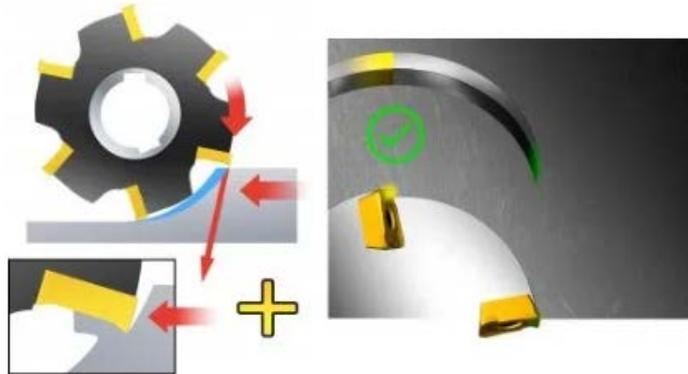


Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2024)

No fresamento concordante (Figura 4), esses efeitos são minimizados, pois o avanço e o movimento de corte ocorrem no mesmo sentido, o que melhora o controle sobre a usinagem. A aresta de corte da ferramenta penetra na peça com a espessura de corte máxima, e diminui

gradualmente até chegar a zero. Nesse tipo de fresamento, tanto o desgaste da ferramenta quanto sua vida útil tendem a ser mais favoráveis (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 4 – Fresamento concordante



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2024)

Para STEMMER (2005, o fresamento concordante tem vantagens em relação ao discordante, menor desgaste, menor força e potência no avanço e melhor acabamento superficial.

2.1.1 Fresa de Topo

A fresa é uma ferramenta utilizada no processo de fresamento (Figura 5), a mesma tem haste cilíndrica, e são formadas por múltiplas arestas de corte, chamadas de gumes, que giram em torno de um eixo, pode ser usada para desbaste e acabamento (KLOCLE, 2011).

Figura 5 – Fresa de topo



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2024)

A ferramenta utilizada no processo de fresagem, é submetida a uma operação de corte interrompida, em que seus dentes entram e saem do material a cada revolução. Esse movimento

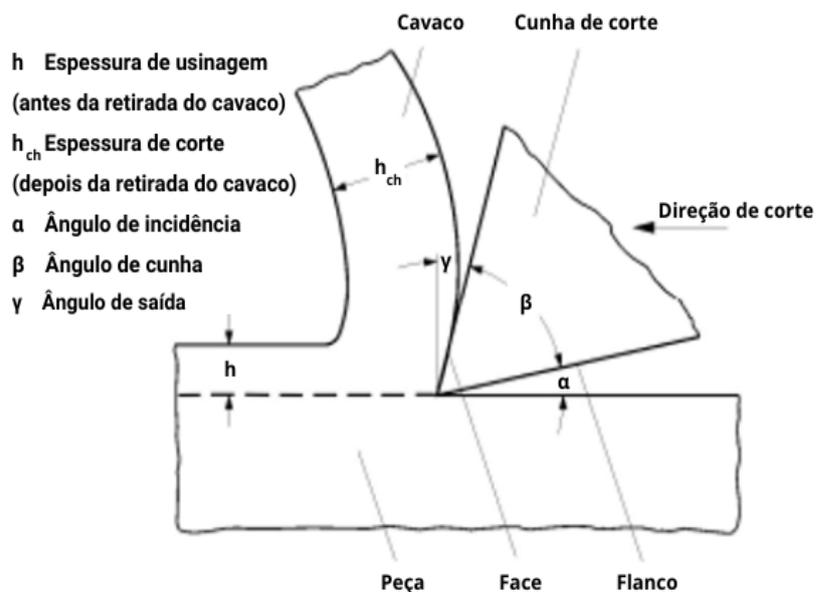
contínuo expõe os dentes a ciclos de impacto e variações térmicas, o que exige que tanto o material quanto a geometria da fresa sejam projetados para suportar essas condições rigorosas (GROOVER, 2013).

A fresa de topo é amplamente utilizada em operações como faceamento, ranhuramento, criação de cavidades, rebaixos, gravações, fresamento de contornos entre outros, sendo capazes de cortar tanto pela periferia quanto pela parte frontal. Essas fresas podem ter corte à direita ou à esquerda. Quando o corte ocorre simultaneamente na periferia e na parte frontal, os cavacos são puxados para cima, gerando uma força axial que tende a deslocar a ferramenta do suporte. Isso exige uma fixação mais robusta, sendo necessário um aperto mais intenso no sistema de fixação (STEMMER, 2005).

2.1.2 Mecânica da formação do Cavaco

No início da formação do cavaco (Figura 6), a seção de corte penetra no material, causando deformações elásticas e plásticas. Quando a tensão de cisalhamento excede o limite do material, ele começa a fluir, formando o cavaco que sai pela face de corte. Essa deformação plástica não depende apenas do material, mas também pode ser influenciada pela tensão da usinagem, através da superfície do contato entre a ferramenta e o material (KLOCLE, 2011).

Figura 6 – Formação do corte

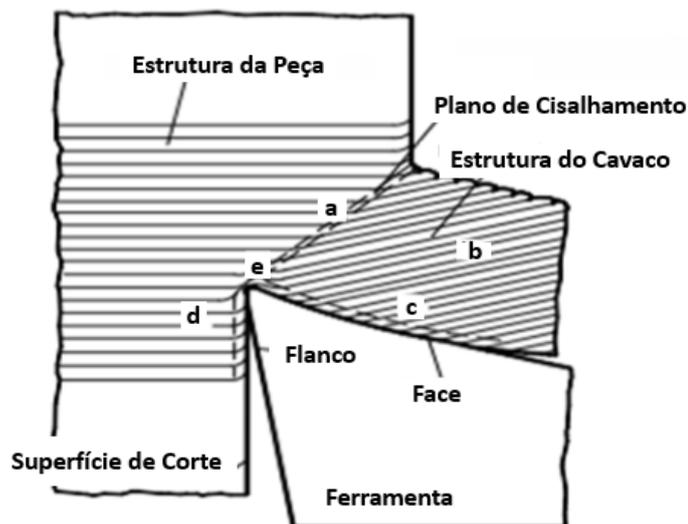


Fonte: Adaptado de König, (2002)

A quantidade de tensões é afetada pelo avanço de corte (F_z), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (A_p). A direção da tensão na seção de corte é determinada pelo ângulo de saída da ferramenta (γ), ângulo de incidência (α) e ângulo de cunha (β). Para que o cavaco seja formado corretamente, uma espessura mínima e profundidade de corte precisam ser superadas (KLOCLE, 2011).

Na formação do cavaco durante o processo de corte pode ser dividida em cinco áreas distintas conforme (Figura 7). À medida que o material é cortado, ocorre uma transição gradual entre a estrutura original da peça (a) e a estrutura do cavaco (b). Essa mudança acontece através do cisalhamento simples, que ocorre em uma zona específica chamada zona de cisalhamento. A combinação de carga de tração com pressão ativa perpendicular simultânea, somada às altas temperaturas predominantes na região, resulta em deformações intensas nas periferias da face de saída (c) e da superfície cortada (d). O deslizamento sobre as superfícies da ferramenta gera deformações plásticas adicionais nas camadas de borda. A área (e) pode ser identificada dependendo da fragilidade ou deformabilidade do material, com o destacamento ocorrendo na frente da aresta de corte (KLOCLE, 2011).

Figura 7 – Formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Klocke, (2011)

As três classificações de cavacos mais comuns, citadas nas literaturas alemãs e americanas, são: cavaco contínuo, cavaco de cisalhamento e cavaco de ruptura. O cavaco contínuo é formado por lamelas juntas e de maneira contínua, com um leve deslizamento entre elas, sendo característico da usinagem de materiais dúcteis e homogêneos. O cavaco de cisalhamento se distingue por apresentar grupos lamelares bem definidos, resultando da redução

da resistência do material no plano de cisalhamento, provocada por fatores como deformação elevada, grandes avanços e velocidades, o que causa variações na espessura do cavaco. Já o cavaco de ruptura é composto por fragmentos arrancados da peça, ocorrendo devido a uma ruptura completa do material na região de cisalhamento. Esse tipo de cavaco é típico na usinagem de materiais frágeis ou heterogêneos, como ferro fundido ou latão, e também pode se formar em condições de grandes avanços (FERRARESI, 1969).

Conforme Altintas et al. (2020), a dinâmica do corte é influenciada pelas vibrações, que resultam em variações na espessura do cavaco. Essas vibrações, deixadas na superfície durante o passe anterior, podem interagir com as vibrações geradas no passe atual, amplificando os movimentos e comprometendo a estabilidade do processo de usinagem. Quando a ferramenta vibra, a espessura do cavaco se torna irregular devido às alterações na posição relativa entre a ferramenta e a peça. Para atenuar esses efeitos e aprimorar a eficiência do corte, é fundamental saber fazer a escolha do sistema de fixação mais apropriado para cada operação.

2.2 SISTEMAS DE FIXAÇÃO

Existem diversos métodos para fixar a ferramenta no sistema de fixação, conforme ilustrado na Figura 8. Para uma fixação eficaz, é essencial que a união entre a ferramenta e o sistema de fixação seja rígida, garantindo estabilidade durante a operação. Além disso, é necessário um alinhamento preciso entre o eixo da ferramenta e o eixo-árvore da máquina, bem como um baixo nível de batimento da ferramenta, assegurando alta precisão e minimizando vibrações que possam comprometer a qualidade da usinagem (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Figura 8 – Sistemas de fixação



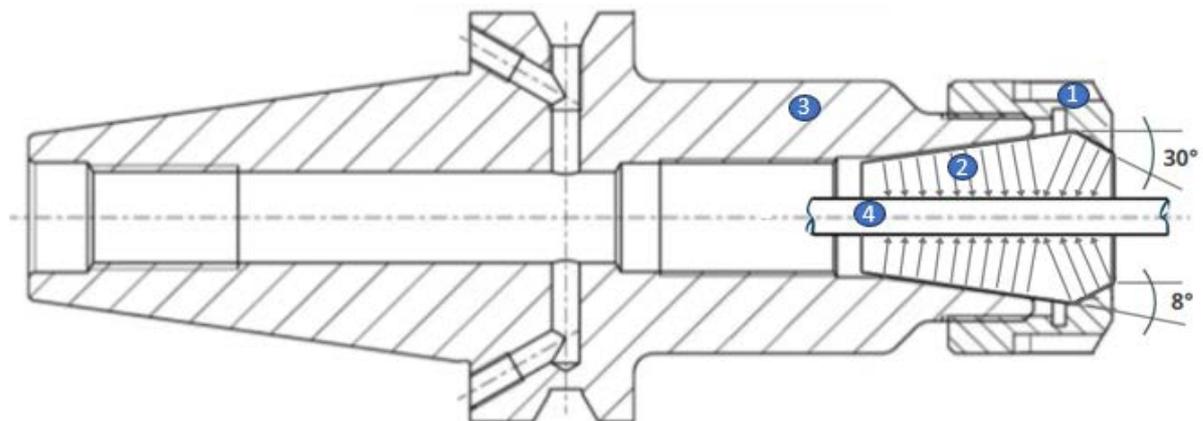
Fonte: Adaptado de Seco Tools (2024)

Conforme Lacalle (2009), o sistema de fixação mecânica utilizando porta-pinça é amplamente utilizada por ser um sistema de baixo custo, enquanto os hidráulicos oferecem maior rigidez e eficiência no aperto.

2.2.1 Sistema de fixação porta-pinça

Essa fixação é amplamente empregada em operações de usinagem devido à sua versatilidade e bom custo-benefício. Foi desenvolvida em um período em que predominavam as ferramentas de aço rápido, utilizadas em condições de corte com velocidades mais baixas. Os dispositivos foram concebidos para proporcionar uma fixação eficaz em cenários operacionais menos exigentes. Contudo, com o avanço das ferramentas de metal duro, que possuem hastes com menor rugosidade superficial, podem ocorrer deslizamentos da ferramenta dentro da pinça, especialmente em operações mais severas, como o desbaste. Apesar dessas limitações continua sendo muito utilizado na indústria (CAVICHIOILLI, 2003).

Figura 9 – Sistema interno porta-pinça



Fonte: Adaptado de Schunk (2025)

Para prender a ferramenta, conforme ilustrado na Figura 9, é necessário apertar uma porca (1) com uma chave específica. A pinça (2), posicionada entre a porca e o corpo do sistema de fixação (3), é comprimida pela ação combinada do ângulo frontal de 30° da porca com o ângulo de 8° do sistema. Essa combinação angular provoca a contração da pinça, que, por sua vez, exerce pressão sobre a haste da ferramenta (4), promovendo a fixação. No entanto, a concentricidade da ferramenta pode ser comprometida, uma vez que depende diretamente da precisão do acoplamento entre o sistema de fixação, porca e a pinça (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

2.2.2 Sistema de fixação hidráulico

Este sistema representa uma solução moderna em comparação ao tradicional porta-pinça, embora apresente um custo mais elevado. Foi projetado para oferecer balanceamento e excentricidade precisos, por meio de um aperto uniforme na haste da ferramenta. O dispositivo apresenta elevada força de fixação, além de garantir precisão e repetibilidade nas trocas, o que o torna eficaz para uma ampla variedade de aplicações (CAVICHIOILLI, 2003).

Figura 10 – Sistema interno hidráulico



Fonte: Adaptado de Schunk (2025)

Para prender a ferramenta, conforme ilustrado na Figura 10, posicionamos a ferramenta (1) dentro do sistema de fixação, após é necessário apertar um parafuso (2) com uma chave *allen*, que aciona o pistão de fixação (3) que comprime o fluido hidráulico no sistema de câmara de óleo, fazendo a expansão da membrana uniformemente (4) contra a haste da ferramenta, deixando-a centralizada e bem presa. Possui uma base (5), que possui um parafuso de ajuste de comprimento (6), a haste da ferramenta é centralizada de forma perfeita, porque na membrana existe ranhuras (7) para o deslocamento de eventuais resíduos de graxa e óleos que possam prejudicar a fixação (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

A fixação correta não apenas diminui o desgaste da ferramenta, mas também aumenta sua vida útil. Esses benefícios contribuem para uma maior sustentabilidade nas operações de usinagem, além de gerar economias significativas de custo a longo prazo (THORENZ et al., 2018).

2.3 TIPOS DE DESGASTE

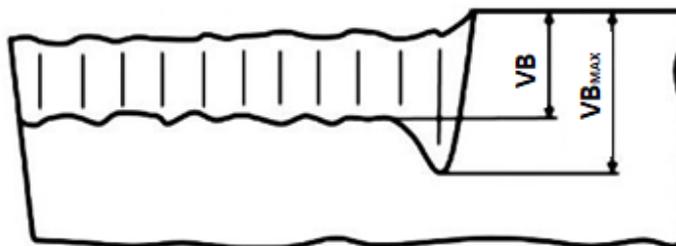
As operações de usinagem exigem o uso de ferramentas de corte, que são submetidas a elevadas forças e temperaturas, criando um ambiente extremamente agressivo para essas ferramentas. Quando a força de corte ultrapassa o limite suportado, há risco de ruptura da ferramenta. Além disso, se a temperatura atingir níveis críticos, o material da ferramenta pode perder sua dureza, levando ao desgaste excessivo. Mesmo que essas condições não causem uma falha imediata, o desgaste progressivo da aresta de corte eventualmente comprometerá o desempenho da ferramenta (GROOVER, 2013).

Existem diversos tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de usinagem. Antes de defini-los, é importante diferenciá-los. O desgaste refere-se à perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta, causada pela ação do corte ao longo do tempo. Já as demais ocorrências, como quebras, lascamentos e trincas, são classificadas como avarias, uma vez que representam falhas mais abruptas e severas, que comprometem imediatamente a funcionalidade da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.3.1 Desgastes

O desgaste no flanco (Figura 11) de uma ferramenta de corte ocorre devido ao atrito gerado entre a superfície da peça usinada e a região de contato no flanco da ferramenta. Devido à rigidez da peça, a área afetada, conhecida como zona de desgaste do flanco, tende a ser paralela à direção do corte. A largura dessa área de desgaste é frequentemente utilizada como um indicador do nível de desgaste da ferramenta e pode ser facilmente medida utilizando um microscópio especializado, o desgaste de flanco (VB), é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura do desgaste de flanco máximo (VB_{MAX}) (BOOTHROYD, 1989).

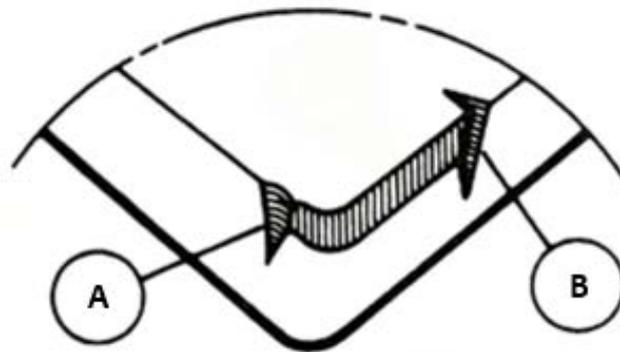
Figura 11 – Desgaste de flanco



Fonte: Adaptado de Diniz (2013)

O desgaste de entalhe se forma nas extremidades da área de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Esse tipo de desgaste pode alterar o formato da ponta da ferramenta, o que impacta diretamente a qualidade do acabamento da superfície usinada. Esse fenômeno é agravado por aumentos na temperatura e na velocidade de corte, que aceleram o processo de desgaste, gerando fissuras nas extremidades, indicadas na Figura 12. As letras (A) e (B) indicam o local das fissuras (MACHADO et al., 2015).

Figura 12 – Desgaste de entalhe



Fonte: Adaptado de Diniz (2006)

Para STEMMER (2005), estudo do desgaste é importante, como mostrado acima, pois os materiais se comportam de maneiras distintas, sendo essencial identificar fatores que possam prevenir e evitar avarias na ferramenta.

2.3.2 Avarias

As trincas são um tipo comum de avaria nas ferramentas de corte, especialmente em processos onde a aresta de corte está sujeita a tensões alternadas. Essas tensões surgem principalmente durante cortes interrompidos, quando a ferramenta entra e sai continuamente da superfície de trabalho. A aresta de corte aquece rapidamente devido ao atrito e à energia gerada, e, ao sair do material, resfria de forma abrupta, esse ciclo repetido de aquecimento e resfriamento gera trincas térmicas, que costumam se formar perpendicularmente à aresta de corte. Essas trincas comprometem a integridade da ferramenta, reduzindo sua vida útil e prejudicando o desempenho geral da usinagem, podendo levar à falha prematura da ferramenta (KLOCLE, 2011).

O lascamento é outro tipo de avaria na ferramenta que se distingue dos desgastes do tipo frontal e cratera, os quais removem pequenas partículas de maneira contínua. No caso do lascamento, partículas maiores são retiradas de forma abrupta. Esse tipo de dano ocorre com maior frequência em ferramentas fabricadas com materiais frágeis ou quando a aresta de corte não possui reforço adequado. O lascamento, se não controlado, pode evoluir até resultar na quebra completa da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

A quebra da ferramenta pode ser o resultado do desgaste progressivo e de avarias acumuladas, mas também pode ocorrer de forma repentina devido a diversos fatores. Entre eles, destacam-se a alta dureza da ferramenta, que quanto mais resistente ao desgaste, menos tenaz e mais vulnerável a choques. Outros fatores incluem sobrecarga de corte, raios e ângulos de ponta ou de cunha inadequados, cortes interrompidos e paradas bruscas no movimento. A quebra pode não apenas danificar a aresta de corte, mas também comprometer a pastilha inteira e, em casos mais graves, afetar o sistema de fixação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

2.3.3 Mecanismo Causadores do Desgaste da Ferramenta

A adesão ocorre quando dois metais entram em contato sob alta pressão, temperatura e baixa velocidade de corte, resultando na formação de ligações entre eles. Esse fenômeno é particularmente comum entre o cavaco e a face de saída da ferramenta. Conforme o cavaco desliza pela ferramenta, pequenas partículas do material da ferramenta aderem à sua superfície e acabam sendo arrancadas, provocando atrito e desgaste. Em operações de corte a velocidades relativamente baixas, o atrito se torna o mecanismo predominante de desgaste. Nessas condições, o fluxo de material ao longo da aresta de corte tende a ser mais irregular e intermitente, levando à formação de uma aresta postiça, que pode comprometer a eficiência do corte e o acabamento da peça (WRIGHT, TRENT, 2000).

A abrasão, também conhecida como atrito mecânico, é uma das principais formas de desgaste que afeta as ferramentas de corte. Esse tipo de desgaste pode ocorrer tanto na parte frontal quanto na região de saída de cavaco, mas é mais evidente no desgaste frontal, já que a superfície de folga entra em contato com a peça, um material mais rígido, enquanto a face de saída interage com o cavaco, que é mais maleável. O desgaste abrasivo é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pelo aumento da temperatura durante o corte, o que diminui a resistência da ferramenta. Quanto maior for a dureza a quente da ferramenta,

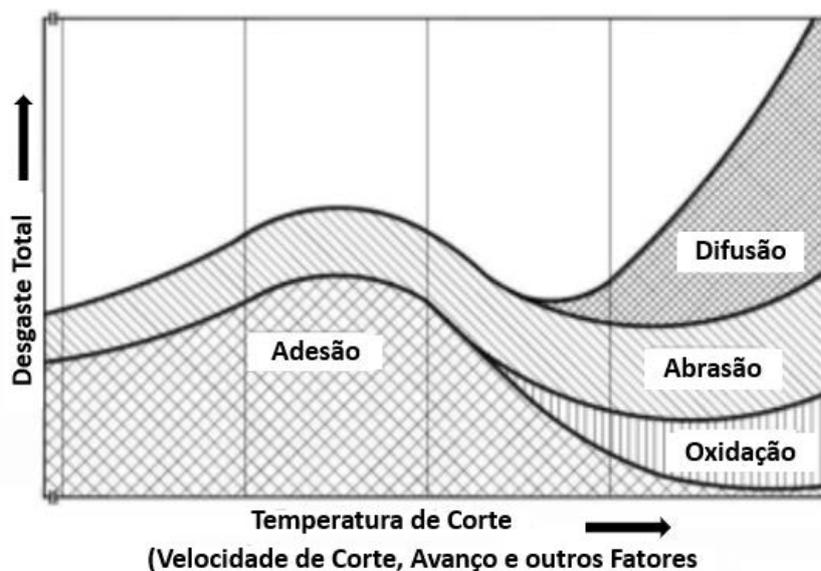
maior será sua capacidade de resistir ao desgaste abrasivo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

A difusão é um fenômeno em que há a troca de átomos entre dois materiais em contato próximo. No caso do desgaste de ferramentas, esse processo ocorre na interface entre a ferramenta e o cavaco, levando à perda de átomos essenciais para a dureza da ferramenta. Com o avanço da difusão, a superfície da ferramenta se torna mais vulnerável a outros tipos de desgaste, como abrasão e adesão. Esse mecanismo é frequentemente apontado como um dos principais responsáveis pelo desgaste por crateras (GROOVER, 2013).

A oxidação ocorre quando a ferramenta de corte reage quimicamente com o material da peça ou com outros elementos presentes no ambiente, como o oxigênio do ar ou substâncias como enxofre e cloro encontrados em fluidos de corte. Esses compostos formados podem ser removidos pelo cavaco na face de saída ou pelo próprio material da peça. O desgaste por oxidação tende a se concentrar nas extremidades da área de contato entre a ferramenta e o cavaco, onde há maior exposição ao ar, o que pode explicar o surgimento do desgaste por entalhe (CHILDS, 2000).

Na Figura 13, são mostrados os principais mecanismos causadores de desgaste que ocorrem em ferramentas de corte: adesão, abrasão, difusão e oxidação.

Figura 13 – Principais mecanismos causadores de desgaste



Fonte: Adaptado de Klocle (2011)

Para Diniz (2006), o desgaste de flanco é causado principalmente por abrasão e cisalhamento da aresta postiça, e o desgaste de entalhe pela ação da aderência e oxidação.

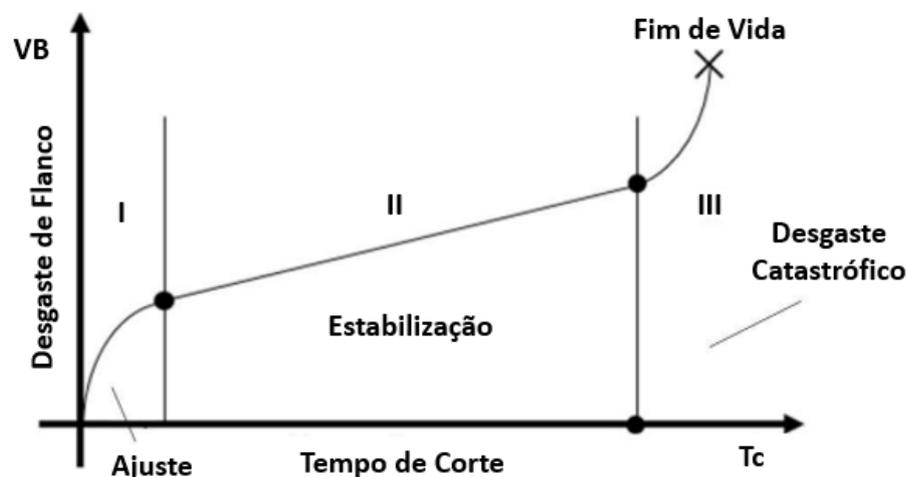
2.3.4 Vida da Ferramenta

Conforme a ferramenta se desgasta, o processo de usinagem sofre alterações significativas. A temperatura aumenta progressivamente, elevando também a força de corte e o consumo de potência. As dimensões da superfície usinada podem variar, e a qualidade do acabamento superficial tende a piorar. Em condições extremas, pode ocorrer faiscamento intenso durante o corte, o gume pode superaquecer, perdendo dureza. (STEMMER, 2005).

A vida útil da ferramenta corresponde ao período durante o qual ela opera de forma eficiente, mantendo sua capacidade de corte de acordo com critérios predefinidos de desempenho. Após esse intervalo, a ferramenta deve ser substituída ou reafiada para garantir a continuidade do processo de usinagem com qualidade e precisão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Outra forma de avaliar a vida útil da ferramenta é por meio da curva de vida (Figura 14), que geralmente envolve a construção de um gráfico auxiliar para registrar a variação do desgaste de flanco (VB) ao longo de diferentes tempos de usinagem. Essa curva é dividida em três fases: na fase I, ocorre um desgaste mais acentuado devido ao ajuste inicial do gume à condição de corte; na fase II, o desgaste é controlado e ocorre de maneira mais lenta, permitindo um tempo de corte prolongado; na fase III, o desgaste se intensifica, acompanhado por um aumento significativo da temperatura, exigindo a substituição da ferramenta para evitar sua quebra (FERRARESI, 1969).

Figura 14 – Curva de comportamento de desgaste



Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2015)

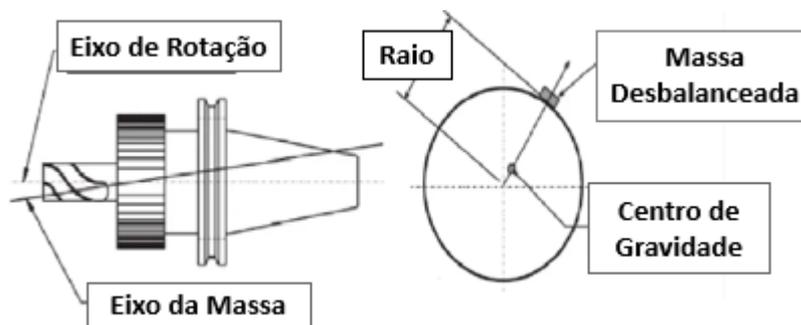
2.4 INFLUÊNCIAS NO SISTEMA DE FIXAÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que remove material de uma peça bruta para obter a forma desejada, utiliza uma ferramenta de corte que é presa em um sistema de fixação, pode ser porta-pinça ou hidráulico. O sistema de fixação apresenta características geométricas e dinâmicas específicas durante o processo, sendo fundamental compreender o impacto do balanceamento, da excentricidade e da vibração (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

2.4.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento (Figura 15) ocorre quando o eixo de massa de um rotor não está alinhado com o eixo de rotação. Essa condição pode ser provocada por três fatores principais: imperfeições no material de base, tolerâncias inadequadas durante o processo de fabricação e um design assimétrico dos sistemas de fixações (MICKELSON, 2007).

Figura 15 – Desbalanceamento da ferramenta



Fonte: Adaptado de Mickelson (2007)

A usinagem em alta rotação é um método amplamente utilizado para garantir eficiência econômica na usinagem de metais. No entanto, o desbalanceamento do sistema de fixação impõe restrições severas à usinagem em alta velocidade, impactando diretamente a qualidade e a precisão das superfícies usinadas. Além disso, o desbalanceamento afeta significativamente a vida útil tanto do eixo quanto da ferramenta, comprometendo a durabilidade e o desempenho do equipamento (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

2.4.2 Excentricidade

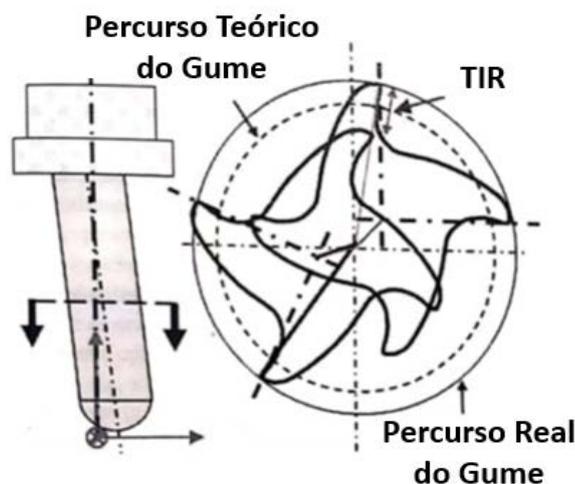
A excentricidade, também pode ser chamado de batimento, é uma característica do sistema de fixação que influencia diretamente tanto a precisão quanto a durabilidade da

ferramenta, embora sua importância seja frequentemente subestimada. Em uma pesquisa informal com clientes sobre o que consideram uma boa excentricidade, a resposta média apontou para um valor aceitável em torno de $12,7 \mu\text{m}$ (MICKELSON, 2007).

O termo *runout*, em usinagem é a diferença do eixo rotacional da ferramenta com o eixo- árvore da máquina. A excentricidade na ferramenta de corte é, geralmente, medida como uma combinação de desvio radial e angular, causada por pequenas imprecisões na operação de montagem da ferramenta no sistema de fixação. Essas imprecisões resultam em uma distribuição desigual das cargas de corte entre os gumes da ferramenta, de modo que um deles acaba suportando cargas maiores do que os demais. Esse desvio pode ser atribuído a fatores como deficiências no sistema de fixação, imprecisões no ajuste da ferramenta durante a fixação, desgaste na própria fixação ou a presença de pequenas imperfeições no sistema de fixação. Tais irregularidades prejudicam a centralidade e a estabilidade da ferramenta, contribuindo para um desgaste irregular e acelerado em pontos específicos da aresta de corte (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

A Figura 16 mostra um sistema de fixação e sua respectiva ferramenta quando possuem um eixo de rotação diferente de seu eixo geométrico. *Total Indicated Runout* (TIR), representa a distância entre a posição máxima e a posição mínima na direção radial. Esse desvio limita a produtividade, pois afeta negativamente o equilíbrio dinâmico, a distribuição da carga de cavacos, o acabamento da peça e a vida útil da ferramenta (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Figura 16 – Excentricidade da ferramenta

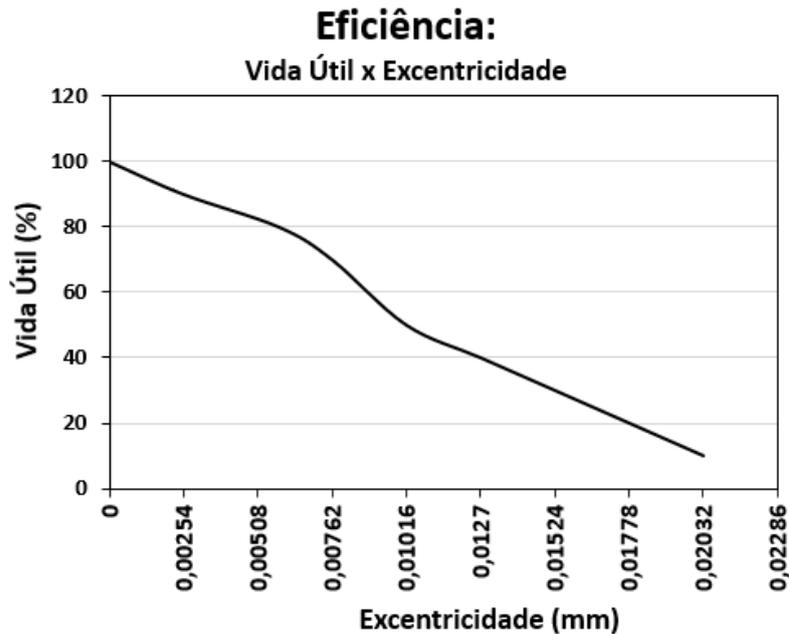


Fonte: Adaptado de Lacalle (2009)

Para o sistema de fixação porta-pinça a pressão de aperto da ferramenta é aplicada por uma porca, que comprime a pinça ao redor da ferramenta, esta forma de fixação resulta em uma

excentricidade entre 20 e 40 μm . Em comparação, a fixação hidráulica exerce uma força de aperto superior à da pinça, envolvendo toda a haste da ferramenta, esse método proporciona menor batimento, com valores entre 3 e 10 μm . Testes práticos revelam que em média a cada 10 μm de batimento, a ferramenta tem sua vida útil reduzida em 50%, conforme Figura 17 (CAVICHIOILLI, 2003).

Figura 17 – Gráfico de vida útil x excentricidade



Fonte: Adaptado de Michelson (2002)

É possível estabelecer uma relação entre a eficiência da vida útil da ferramenta e a excentricidade. Quando o desvio é nulo, excentricidade igual a zero, a expectativa teórica de vida útil da ferramenta é de 100%. No entanto, ao consultar o gráfico para uma excentricidade de 12,7 μm , observa-se que a eficiência da vida útil da ferramenta cai para aproximadamente 50%, espera-se que a ferramenta atinja apenas metade de sua vida útil projetada (MICKELSON, 2007).

2.4.3 Vibração

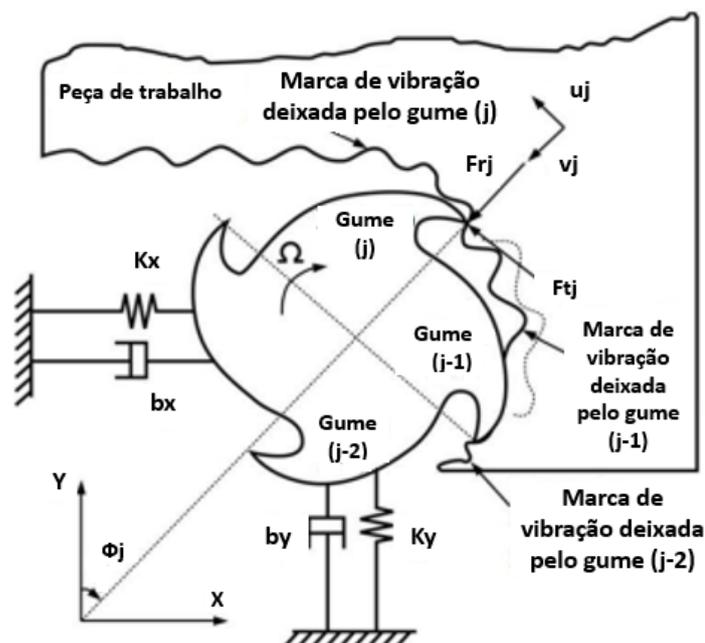
A vibração é o movimento oscilatório de um sistema dinâmico em torno de uma posição de equilíbrio estática, causado por uma excitação externa variável no tempo. Nas ferramentas de fresamento de alta velocidade pode causar cargas dinâmicas indesejadas nos mancais dos eixos das máquinas, levando a vibrações que afetam diretamente a precisão e a qualidade da usinagem. Essas vibrações são prejudiciais ao processo, pois não apenas desgastam os

componentes da máquina de forma acelerada, como também comprometem a integridade da peça usinada e podem reduzir a vida útil da ferramenta (ALTINTAS, 2000).

A relação entre o comprimento (L) e o diâmetro (D) de uma ferramenta tem uma grande influência na rigidez estrutural do sistema de fixação, com comportamentos semelhantes aos de um cilindro engastado submetido a forças. Ferramentas mais longas e de menor diâmetro apresentam menor rigidez, tornando-se mais suscetíveis a deflexões e vibrações durante o corte. O material da haste da ferramenta também afeta a deflexão e a frequência natural de vibração, materiais mais densos e com maior massa tendem a ter uma frequência natural mais baixa, o que ajuda a reduzir a amplitude das vibrações. Além disso, a fixação da ferramenta mais próxima do eixo-árvore pode ajudar a amortecer vibrações indesejadas, melhorando a estabilidade do processo de usinagem, elas podem ser do tipo forçada ou auto excitada (NEVES, 2002).

A vibração forçada depende de forças variáveis, que podem ser geradas de diferentes maneiras, o modo como o cavaco é cisalhado, o gume posição da ferramenta ao se desprender e se reformar, ou ainda uma superfície previamente vibrada pode fazer com que a ferramenta reproduza essa frequência. Segundo STEMMER (2005), a vibração da ferramenta pode atingir valores elevados, em torno de 2000 ciclos por segundo, enquanto a vibração da peça tende a ser menor, cerca de 150 ciclos por segundo, devido à sua fixação mais rígida.

Figura 18 – Vibração na ferramenta



Fonte: Adaptado de Silva (2018)

A vibração auto excitadas acontece da instabilidade do sistema peça e ferramenta, isso ocorre quando cada gume da ferramenta de corte interage com as ondulações deixadas pelo gume anterior (Figura 18). Essas ondulações levam a variações na espessura do corte e nos esforços tangenciais e radiais aplicados à ferramenta, que são dependentes da direção de avanço. Com isso, cada gume sofre um carregamento variável a cada rotação, devido à flutuação na espessura do material removido. Esse tipo de vibração auto excitada cria um ciclo de realimentação, onde as ondulações amplificam as vibrações, comprometendo a estabilidade do processo de fresamento (ANTONIALLI, 2009).

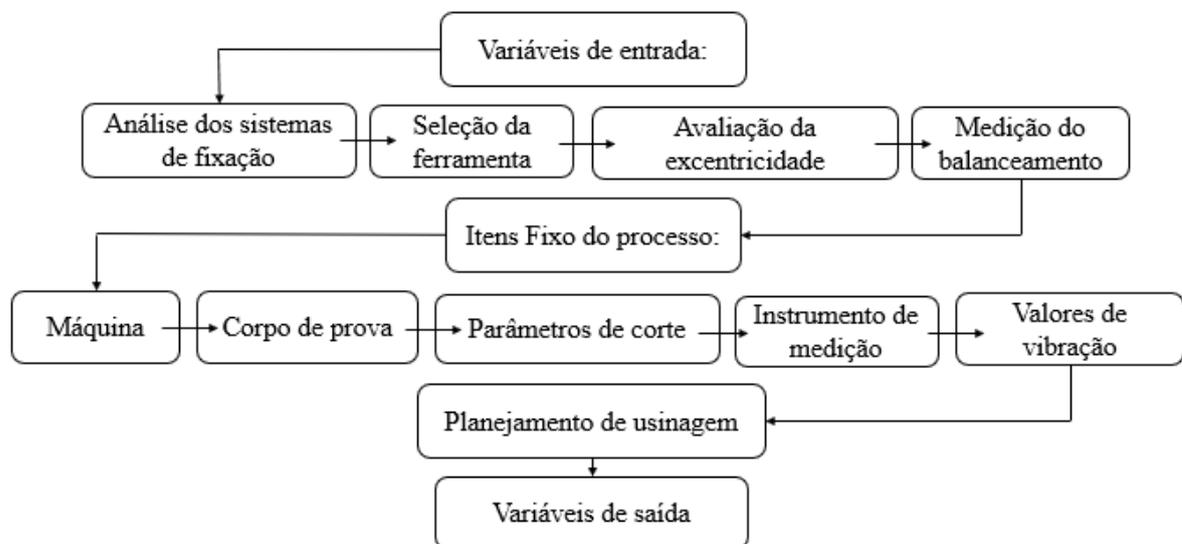
A falta de controle das vibrações na usinagem pode causar vários efeitos adversos, incluindo a redução da eficiência do processo. As ferramentas de corte nem sempre suportam o choque vibratório gerado pelo impacto repetido entre a ferramenta e a peça de trabalho. Esses choques podem provocar avarias à ferramenta, como lascamento e até quebra, afetando a qualidade superficial das peças usinadas, reduzindo a vida útil da ferramenta e comprometendo a produtividade, além de aumentar os custos de produção (MAGALHÃES, 2024).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados para investigar a influência do sistema de fixação da ferramenta no desgaste durante o processo de fresamento. Foram conduzidos quatro ensaios, sendo dois com sistema porta-pinça e dois com sistema hidráulico, com o objetivo de comparar os efeitos de cada sistema sobre a vida útil da ferramenta.

As etapas que compõem a metodologia deste estudo estão esquematizadas no fluxograma da Figura 19 e descritas em sequência.

Figura 19 – Fluxograma das etapas



Fonte: O autor (2025)

3.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Antes dos ensaios, foram adotadas etapas preparatórias para assegurar a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados, como as caracterizações dos sistemas de fixações, a ferramenta, a forma de medição da excentricidade e a verificação do balanceamento.

3.1.1 Análise dos sistemas de fixações

Com o objetivo de identificar suas influências no experimento, será utilizado um sistema de fixação porta-pinça e um hidráulico, ambos com alturas semelhantes, conforme ilustrado na Figura 20. A relação entre comprimento e diâmetro (l/d) deve ser a menor possível. Para os ensaios, foi adotado uma projeção de 16,5 mm, resultando em uma relação l/d de 2,75.

Figura 20 – Especificação do sistema de fixação

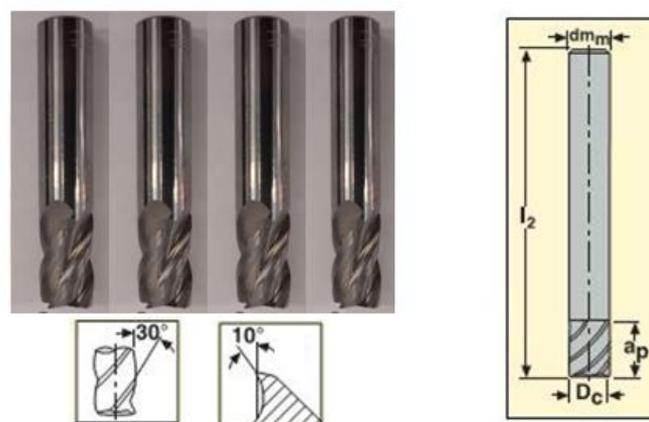


Fonte: O autor (2025)

3.1.2 Seleção da ferramenta

Serão utilizadas quatro fresas de metal duro, com diâmetro de 6 mm e quatro gumes, sem revestimento. As ferramentas, fornecidas pela Seco Tools, pertencem à linha Jabro, código 91060. A Figura 21 apresenta as ferramentas em seu estado original, evidenciando a ausência de raio na quina de corte.

Figura 21 – Ferramenta de corte



Tipo	Código	D_c	dm_m	l_2	a_p	z_n
J91	91060	6	6	65	20	4

Fonte: Adaptado de Ost (2016)

3.1.3 Avaliação da excentricidade

A medição da excentricidade será feita diretamente na ferramenta, que vai estar montada no eixo-árvore da máquina com seu devido sistema de fixação. Para este procedimento será utilizado um relógio apalpador da marca Käfer, com resolução de 2 μm , conforme ilustrado na Figura 22.

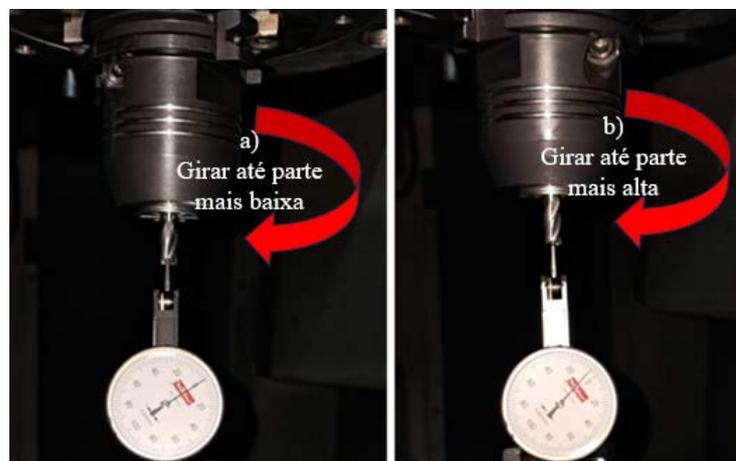
Figura 22 – Relógio apalpador



Fonte: Acervo Aços e peças Demore (2025)

Para a captura do valor da excentricidade vai ser encostado o relógio na ferramenta e girado manualmente o eixo-árvore até encontrar a parte mais baixa da ferramenta (a), fazendo o zeramento do relógio nesta posição, e novamente girando o eixo-árvore até encontrar o valor mais alto (b), conforme ilustrado na Figura 23, e tomando nota destes valores. Será repetido duas vezes para o sistema porta-pinça e duas vezes também para o hidráulico.

Figura 23 – Medição da excentricidade



Fonte: O autor (2025)

3.1.4 Medição do Balanceamento

Para a medição do balanceamento será utilizado um leitor de balanceador modelo NK600, em conjunto com o acelerômetro NK20, conforme ilustrado na Figura 24. O balanceamento será avaliado com base nos níveis globais de vibração, a velocidade é expressado em mm/s RMS. Com o sistema de fixação montado e fixo no eixo-árvore, será acionada a rotação constante de 9554 rpm, por um período de dois minutos, será feito a medições nas posições horizontal e vertical, conforme Figura 25. A avaliação será feita nos sistemas porta-pinça e hidráulico.

Figura 24 – Balanceador NK600



Fonte: Adaptado de Teknikao (2025)

Figura 25 – Posições do balanceador



Fonte: O autor (2025)

3.2 ITENS FIXOS DO PROCESSO

Para garantir consistência nos resultados a máquina, corpo de prova, os parâmetros de corte e os sensores de vibração, serão mantidos fixos em todo o teste. Isso permitirá focar exclusivamente nas diferenças de desgaste e na análise de vibração geradas por cada tipo de suporte de fixação.

3.2.1 Máquina

Para executar a usinagem será utilizado máquina com comando numérico computadorizado CNC, chamado centro de usinagem do modelo VC 430 da marca Doosan Machine Tools, conforme ilustrada na Figura 26, com potência de 20 HP e rotação máxima de 12000 rpm. A máquina situa-se na empresa Aços e peças Demore localizada na rua Treze de maio, número 1694, no Bairro Cristo Redentor em Caxias do sul-RS.

Figura 26 – Centro de usinagem Doosan



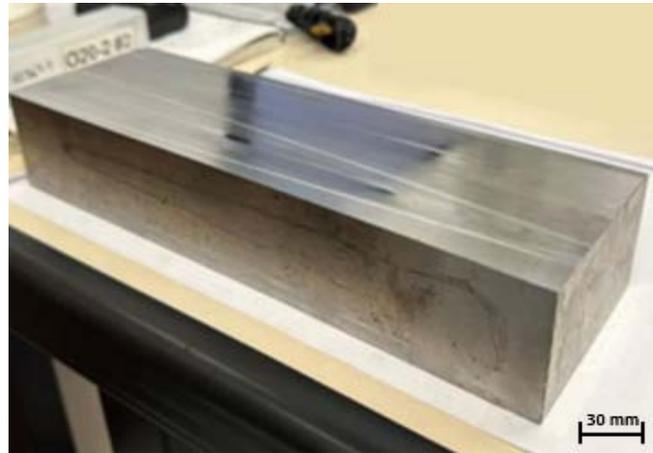
Fonte: Acervo Aços e Peças Demore (2025)

3.2.2 Corpo de Prova

Considerando a realidade da região, escolheu-se o aço AISI P20 como material, com dureza média de 38 HRC, amplamente utilizado nas indústrias de moldes e matrizes para injeção de plásticos. O corpo de prova apresenta dimensões de 252 mm x 80 mm x 60 mm, com faces

retificadas para assegurar um posicionamento mais preciso e planicidade adequada na fixação na máquina-ferramenta, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Corpo de prova



Fonte: UCS – Universidade de Caxias do Sul (2025)

3.2.3 Parâmetros de Corte

Para a usinagem dos experimentos serão utilizados os parâmetros de corte conforme tabela 1, que serão fixos durante os testes.

Tabela 1 – Parâmetros do fresamento

Dados	Valor	Unidade
Velocidade de corte (V_c)	180	m/mim
Avanço por gume (F_z)	0,05	mm/rot
Profundidade de corte axial (A_p)	0,6	mm
Profundidade de corte lateral (A_e)	0,4	mm
Velocidade da ferramenta	9554	rpm

Fonte: O autor (2025)

3.2.4 Equipamento de medição

As medições nas ferramentas serão realizadas com o auxílio de um equipamento de medição óptica da marca Tesa, modelo Tesa Visio 200, conforme ilustrado na Figura 28. O sistema proporciona ampliação de até 42 vezes, e está conectado a um computador equipado com o *software* TESA VISTA 2.0, utilizado para a captura das imagens e a quantificação dos desgastes e das avarias.

Figura 28 – Equipamento de medição Tesa



Fonte: Acervo Aços e peças Demore (2025)

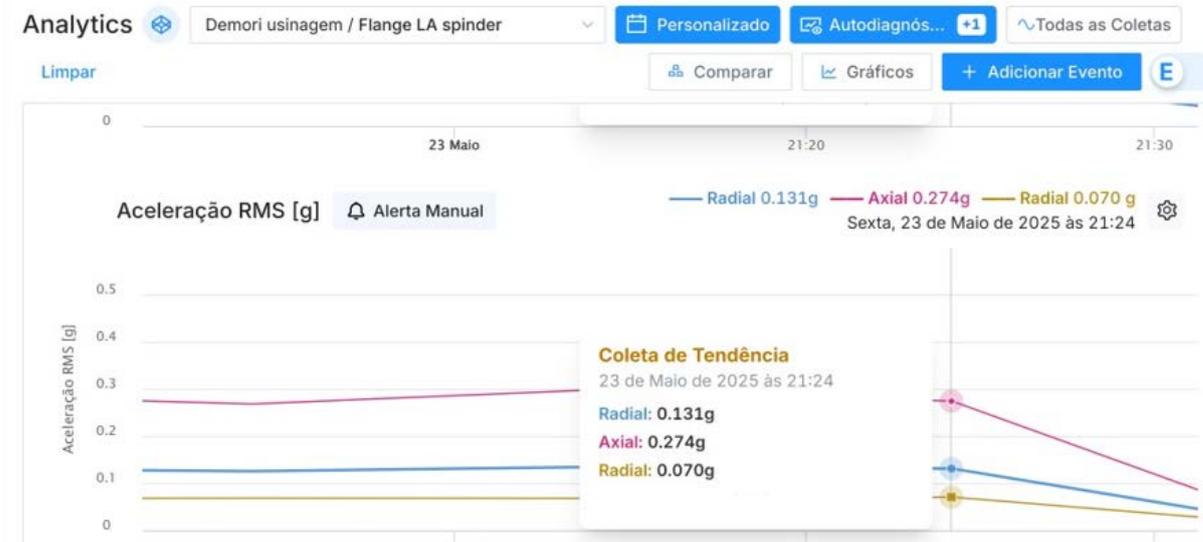
3.2.5 Sensores de vibração

Para a análise das vibrações, utilizaram-se sensores da marca Tractian, com transmissão de dados em tempo real por meio de uma antena Wi-Fi instalada na parte externa da máquina, conforme ilustrado na Figura 29. Essa antena capta os sinais emitidos pelos sensores e os transmite a um computador equipado com o *software* Analytics, responsável pela interpretação dos dados, como mostrado na Figura 30. O sistema permite o monitoramento do espectro de vibração durante o processo de usinagem e, por meio do software, calcula-se a média dos sinais registrados, fornecendo os valores nas grandezas de velocidade RMS (mm/s) e aceleração RMS (g).

Figura 29 – Sensor de vibração Tractian



Fonte: Adaptado de Tractian (2025)

Figura 30 – *Software Analytics*

Fonte: O autor (2025)

Foram instalados dois sensores. O primeiro posicionado logo acima do eixo-árvore, na região de fixação da ferramenta, teve como objetivo captar diretamente as vibrações geradas nos sentidos radial e axial na interface ferramenta-eixo. O segundo sensor foi instalado no interior da máquina, permitindo a medição das vibrações em outro ponto do eixo-árvore, porém apenas no sentido radial. O posicionamento dos sensores está ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Posições dos sensores



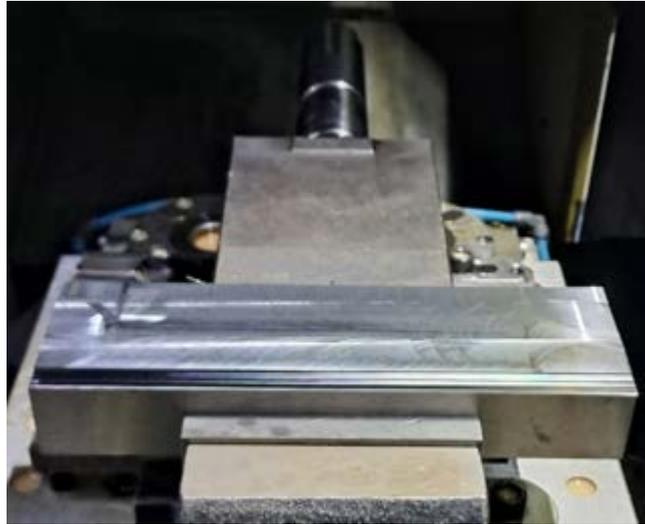
Fonte: O autor (2025)

3.3 PLANEJAMENTO DE USINAGEM

Inicialmente, definiu-se a estratégia de fixação do corpo de prova, o qual foi montado de forma simétrica em uma morsa, conforme ilustrado na Figura 32. Em seguida, realizou-se o

alinhamento da peça, tomando-se como referência sua lateral retificada e utilizando um relógio apalpador, com o qual se obteve uma precisão de 10 μm ao longo de 252 mm de comprimento.

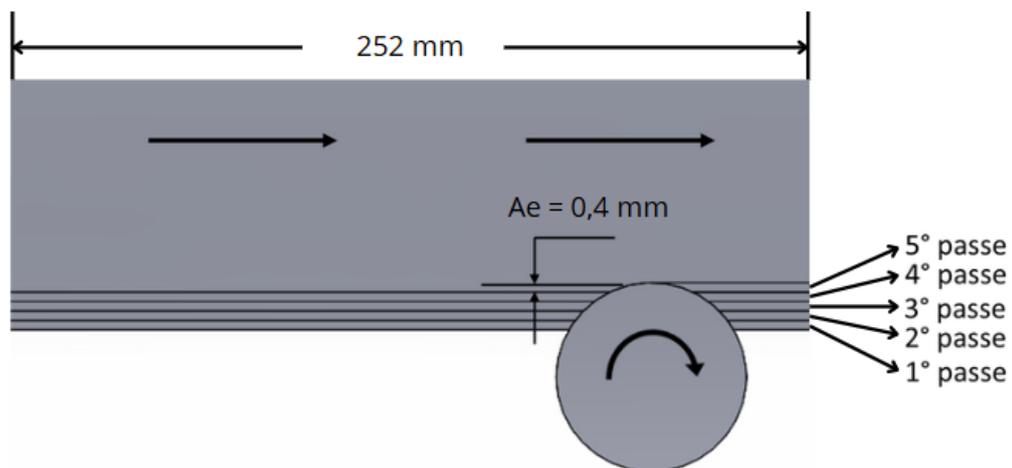
Figura 32 – Fixação do corpo de prova



Fonte: O autor (2025)

O programa NC da máquina foi elaborado para executar a usinagem no sentido concordante, com o objetivo de minimizar vibrações e favorecer o escoamento eficiente do cavaco. A usinagem será realizada em cinco passes consecutivos, conforme mostrado na Figura 33, com deslocamentos laterais previamente definidos pelos parâmetros de corte, intercalados com paradas programadas para medição e avaliação do desgaste gerado durante o processo. Para os testes, não será utilizado lubri-refrigerante.

Figura 33 – Estratégia de usinagem



Fonte: O autor (2025)

3.4 VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída serão medidas diretamente na ferramenta, com o equipamento de medição óptico. Esse procedimento permitirá identificar os mecanismos responsáveis pelo desgaste e realizar a medição do desgaste de flanco (VB). O processo continuará até que a ferramenta atinja o final de sua vida útil, definido pelo valor de desgaste de flanco (VB) igual a 0,2 mm ou pela ocorrência de lascamentos. As interrupções para medição ocorrerão após 5 passes consecutivo, somando um total de 1260 mm de percurso da ferramenta.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios comparativos entre os sistemas de fixação. A análise abrange os dados de desgaste de flanco (VB), gráficos da evolução do desgaste, interpolações para estimativa da vida útil da ferramenta, além de imagens das ferramentas após o uso e os tipos de desgastes observados. Também são abordados os valores de balanceamento, excentricidade e vibrações geradas durante a usinagem.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE FIXAÇÃO

Para compreender o comportamento dinâmico dos sistemas de fixação, foram realizadas três análises complementares: balanceamento, excentricidade e vibração. A medição dos valores do balanceamento buscou identificar desequilíbrios que afetam a estabilidade do processo. A excentricidade avaliou a concentricidade entre a ferramenta e o eixo-árvore. Sensores monitoraram a vibração em tempo real e registraram o desempenho do processo.

A medição do balanceamento teve como objetivo identificar possíveis desequilíbrios nos conjuntos montados, os quais afetam diretamente a estabilidade do processo de usinagem. Os resultados evidenciaram diferenças entre os sistemas, o porta-pinça apresentou maior instabilidade nas direções longitudinal e vertical, enquanto o sistema hidráulico demonstrou melhor distribuição de massa e comportamento mais estável. Esses dados corroboram os estudos de Mickelson (2007) e Lacalle & Lamikiz (2009), que associam o desbalanceamento à redução da vida útil da ferramenta e à piora das condições de corte.

A excentricidade avaliada por meio de medições com relógio comparador, indicou maior precisão no sistema hidráulico. Os conjuntos montados com porta-pinça apresentaram excentricidades superiores às observadas com o sistema hidráulico, confirmando os dados da literatura. Conforme Cavichioli (2003), essa diferença influencia diretamente a estabilidade e a durabilidade da ferramenta, pois menores desvios concêntricos resultam em esforços mais uniformes durante o corte.

Durante os ensaios, sensores monitoraram em tempo real os níveis de vibração gerados na operação. Os espectros de vibração revelaram que o sistema hidráulico apresentou menores amplitudes, tanto em aceleração quanto em velocidade, refletindo maior estabilidade dinâmica. Esse resultado está em conformidade com os fundamentos apresentados por Stemmer (2005), que afirma que vibrações forçadas provocadas por variações nas forças de corte tendem a ser

significativamente menores em sistemas equilibrados. Por sua vez, o porta-pinça demonstrou maior instabilidade vibracional, o que comprometeu a qualidade do corte e acelerou o desgaste da ferramenta, conforme destacado por Magalhães (2024).

4.2 ANÁLISE DO DESGASTE E DA VIDA

Esta seção compara a fixação porta-pinça e hidráulico com base em medições do desgaste de flanco ao longo da usinagem. Os dados coletados em duas réplicas por sistema permitiram analisar a evolução do desgaste e estimar a vida útil. Em seguida, são apresentados os resultados comparativos das três análises complementares: A medição do balanceamento, excentricidade e vibração, que ajudam a explicar o desempenho de cada sistema.

4.2.1 Comprimento do desgaste e vida

Os testes de desgaste realizados com os sistemas de fixação porta-pinça e hidráulico permitiram comparar o desempenho de cada conjunto em termos de desgaste de flanco (VB). Os dados foram coletados em duas réplicas para cada tipo de fixação, em função do comprimento usinado, conforme apresentado na Tabela 2. A análise tem como objetivo comparar os dois sistemas e identificar as diferenças em sua influência sobre a vida útil da ferramenta.

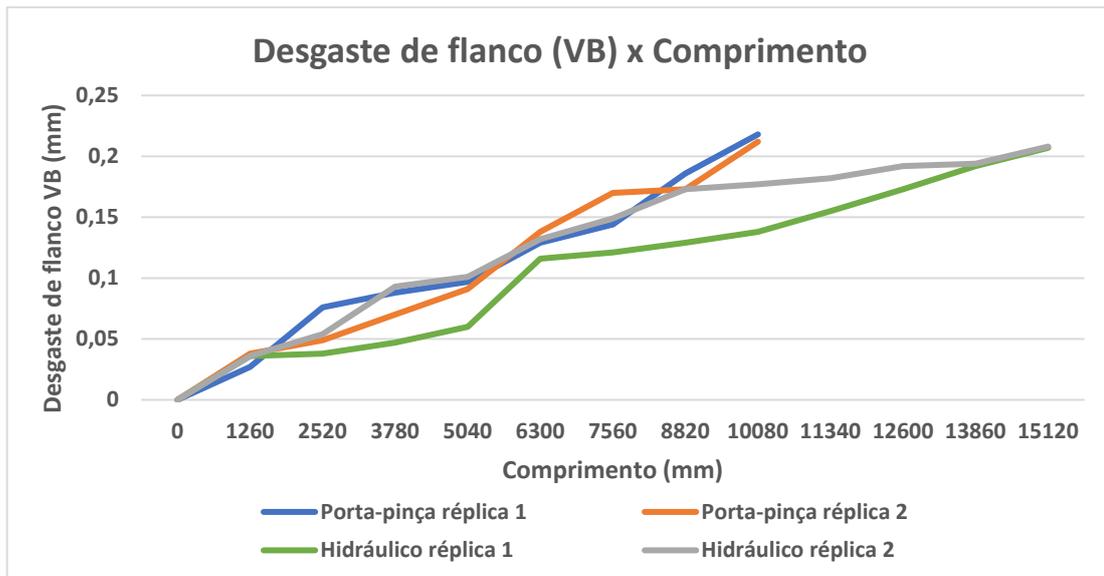
Tabela 2 – Medição do desgaste de flanco (VB)

Comprimento (mm)	Porta-pinça réplica 1 (mm)	Porta-pinça réplica 2 (mm)	Hidráulico réplica 1 (mm)	Hidráulico réplica 2 (mm)
0	0	0	0	0
1260	0,027	0,038	0,036	0,036
2520	0,076	0,049	0,038	0,054
3780	0,088	0,07	0,047	0,093
5040	0,097	0,091	0,06	0,101
6300	0,129	0,138	0,116	0,132
7560	0,144	0,17	0,121	0,149
8820	0,186	0,173	0,129	0,173
10080	0,218	0,212	0,138	0,177
11340			0,155	0,182
12600			0,173	0,192
13860			0,192	0,194
15120			0,207	0,208

Fonte: O autor (2025)

A Tabela 2 apresenta detalhadamente os valores de desgaste de flanco (VB), medidos a cada 1260 mm usinados, nas duas réplicas dos testes com os sistemas de fixação porta-piça e hidráulico. Para facilitar a compreensão da evolução do desgaste ao longo da usinagem e permitir uma comparação visual mais clara entre os sistemas, esses dados também são representados graficamente na Figura 34.

Figura 34 – Gráfico do desgaste



Fonte: O autor (2025)

Para determinar com maior precisão o comprimento usinado no qual o desgaste de flanco (VB) atinge 0,2 mm, foi necessário estimar o ponto exato entre as medições, já que os dados foram coletados em intervalos de 1260 mm. Para isso, aplicou-se o método de interpolação linear, que permite calcular valores intermediários entre dois pontos consecutivos, assumindo um comportamento linear do desgaste nesse intervalo, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comprimento interpolado

Sistema de fixação	VB (mm)	Comprimento interpolado(mm)
Porta-piça réplica 1	0,2	9371,25
Porta-piça réplica 2	0,2	9771,43
Média Porta-piça		9571,34
Hidráulico réplica 1	0,2	14532
Hidráulico réplica 2	0,2	14400,04
Média hidráulico		14466,02

Fonte: O autor (2025)

Com base na interpolação linear dos dados obtidos, é possível afirmar que as ferramentas montadas no sistema porta-piça atingiram o desgaste de flanco (VB) de 0,2 mm após 9571 mm de comprimento usinado. Por outro lado, as ferramentas fixadas com o sistema hidráulico alcançaram esse mesmo nível de desgaste somente após cerca de 14466 mm de usinagem. Essa diferença representa um aumento estimado de aproximadamente 51,1% na vida útil da ferramenta quando se utiliza o sistema de fixação hidráulico em comparação ao porta-piça.

A expressiva vantagem do sistema de fixação hidráulico, já evidenciada na caracterização anterior e respaldada pela literatura especializada, é reafirmada pelos dados experimentais que serão apresentados a seguir. As Tabelas 4, 5 e 6 exibem os resultados das análises comparativas entre os sistemas de fixação, contemplando aspectos como o balanceamento, os valores de excentricidade e as médias dos espectros de vibração.

Os valores da medição do balanceamento, apresentados na Tabela 4, demonstram que o sistema hidráulico teve melhor desempenho em termos de estabilidade. Na direção longitudinal, observou-se uma redução de aproximadamente 29% nos níveis de vibração em relação ao sistema porta-piça. Já na direção vertical, os valores foram próximos, com discreta vantagem para o sistema hidráulico. Esses resultados confirmam que os valores do desbalanceamento comprometem a estabilidade do processo de usinagem e contribui para o aumento do desgaste da ferramenta.

Tabela 4 – Valores do balanceamento

Posição do acelerômetro	Porta-piça Velocidade RMS (mm/s)	Hidráulico Velocidade RMS (mm/s)
Longitudinal	0,318	0,227
Vertical	0,195	0,188

Fonte: O autor (2025)

Os resultados apresentados na Tabela 5 revelam diferenças significativas entre os sistemas de fixação no que se refere à excentricidade. Considerando os valores máximos registrados em cada réplica, o sistema hidráulico apresentou uma redução aproximada de 85,7% em relação ao porta-piça. Essa diferença substancial evidência a superioridade do sistema hidráulico em termos de concentricidade, fator que influencia diretamente na estabilidade do corte.

Tabela 5 – Resultados das excentricidades

	Valor mínimo (μm)	Valor máximo (μm)
Réplica 1 sistema porta-pinça	0	42
Réplica 2 sistema porta-pinça	0	46
Réplica 1 sistema hidráulico	0	6
Réplica 2 sistema hidráulico	0	8

Fonte: O autor (2025)

Complementando as análises, a Tabela 6 mostra que o sistema hidráulico também apresentou redução nas vibrações em comparação ao porta-pinça. Houve uma queda de cerca de 8% na velocidade RMS (mm/s) radial e de 62% na aceleração RMS (g) radial do Sensor 1. No Sensor 2, a aceleração RMS (g) diminuiu aproximadamente 21%. Esses resultados reforçam a melhor estabilidade no processo de usinagem.

Tabela 6 – Dados RMS de velocidade e aceleração da vibração

Parâmetro	Sensor	Sistema porta-pinça	Sistema hidráulico
Velocidade RMS (mm/s)	Radial 1	0,192	0,177
	Axial 1	0,209	0,208
	Radial 2	0,353	0,361
Aceleração RMS (g)	Radial 1	0,343	0,131
	Axial 1	0,303	0,274
	Radial 2	0,089	0,07

Fonte: O autor (2025)

Assim, os resultados das medições de desgaste, excentricidade, balanceamento e vibração mostram que o sistema hidráulico é superior, pois melhora a estabilidade do corte e ajuda a prolongar o tempo de uso das ferramentas, tornando o processo de usinagem mais eficiente. A Tabela 7 apresenta um resumo comparativo entre os dois sistemas de fixação.

Tabela 7 – Comparativo entre os sistemas de fixação

Critério	Porta-Pinça	Hidráulico
Vida útil da ferramenta (mm)	9571	14466
Balanceamento longitudinal		
Velocidade RMS (mm/s)	0,318	0,227
Excentricidade máxima (μm)	46	8
Vibração – Sensor 1 Aceleração RMS (g)	0,343	0,131
Vibração – Sensor 2 Aceleração RMS (g)	0,089	0,07

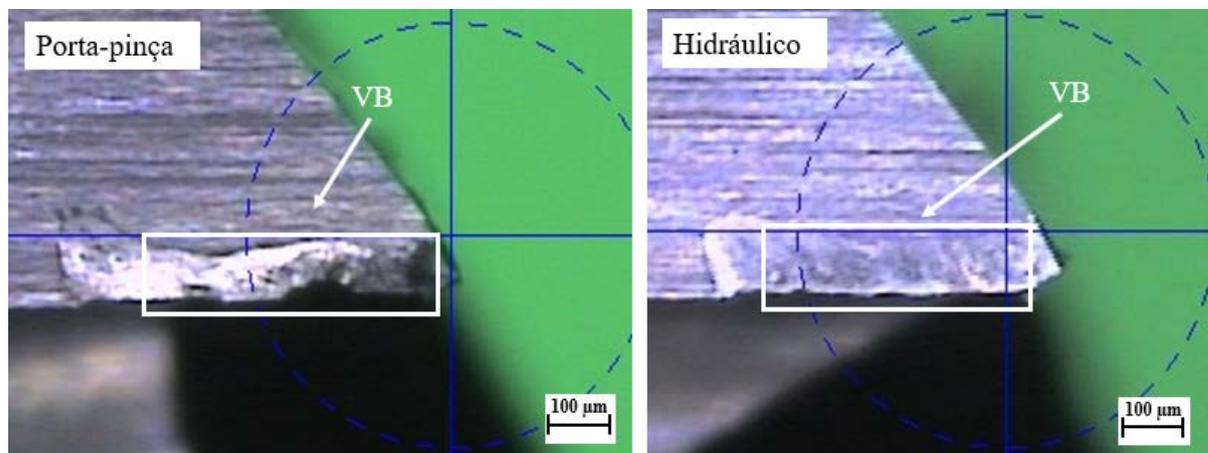
Fonte: O autor (2025)

4.2.2 Tipos e mecanismos de desgaste

A seguir, são apresentadas imagens obtidas durante os ensaios que ilustram os principais tipos e mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas utilizadas. Essas figuras não apenas exemplificam visualmente os modos de falha, como também servem de base para uma análise comparativa entre os sistemas de fixação avaliados. Com elas, é possível compreender de forma mais clara como cada sistema influencia o desempenho da ferramenta, a qualidade do corte e a estabilidade do processo de usinagem.

No que diz respeito ao desgaste de flanco, constatou-se que a ferramenta no sistema porta-pinça apresentou um desgaste mais severo, com marcas desuniformes ao longo da aresta de corte. Esse padrão indica instabilidade durante a usinagem. Por outro lado, a ferramenta montada no sistema hidráulico demonstrou um desgaste mais suave e distribuído, sinalizando maior rigidez estrutural e melhor absorção das forças geradas no processo, conforme demonstrado na Figura 35.

Figura 35 – Desgaste de flanco (VB)

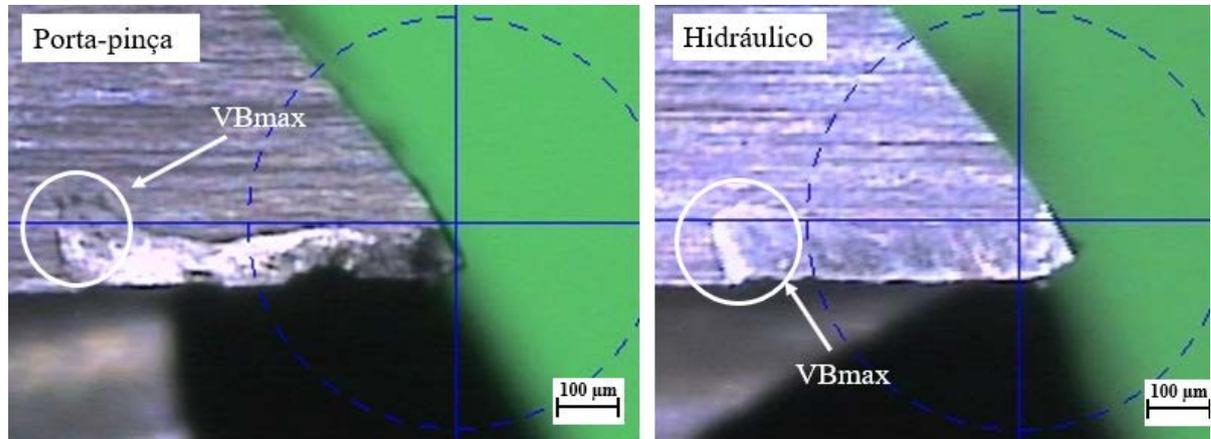


Fonte: O autor (2025)

Ao comparar os dois sistemas de fixação, verifica-se que o valor de desgaste de flanco máximo (VB_{max}) foi significativamente mais alto na ferramenta fixada no porta-pinça, caracterizando-se por uma concentração de desgaste em áreas específicas e um perfil irregular. Isso pode ser atribuído à menor estabilidade e à excentricidade mais acentuada do conjunto. Em contraste, o sistema hidráulico resultou em menor (VB_{max}), com desgaste melhor distribuído,

o que evidência maior controle dimensional e menor propagação do desgaste, como se observa na Figura 36.

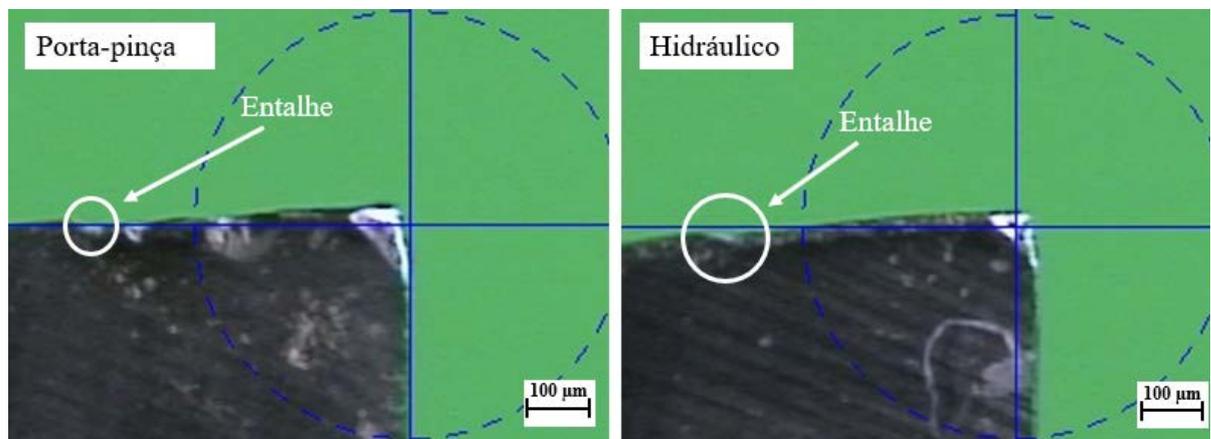
Figura 36 – Desgaste de flanco máximo (VBmax)



Fonte: O autor (2025)

No aspecto do desgaste por entalhe, percebe-se que a fixação via porta-pinça gerou um sulco mais profundo e concentrado na região lateral da aresta de corte, indicando um processo com maior instabilidade, possivelmente intensificado pela menor rigidez e maior excentricidade. Já no sistema hidráulico, o entalhe se apresentou de maneira mais suave e com contorno regular, o que aponta para uma condição de usinagem mais controlada, favorecida por uma fixação mais precisa e pela melhor distribuição das cargas, como visto na Figura 37.

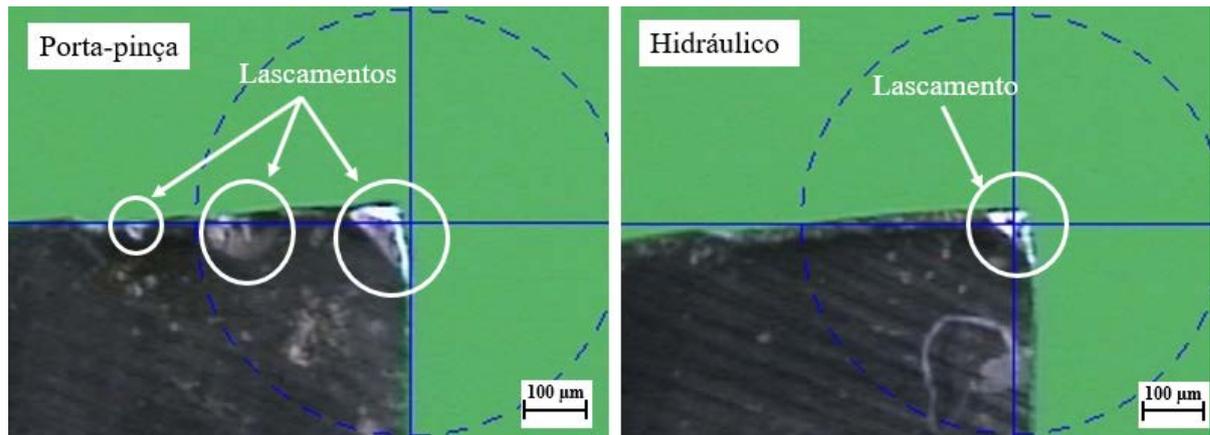
Figura 37 – Desgaste de entalhe



Fonte: O autor (2025)

Em relação ao lascamento, foi observada uma ocorrência mais frequente e dispersa na ferramenta fixada pelo sistema porta-pinça, sinalizando um comportamento instável durante a remoção de material. Em contrapartida, a ferramenta montada no sistema hidráulico mostrou apenas um lascamento pontual e de menor magnitude, sugerindo menor propagação de falhas e, portanto, uma expectativa de vida útil superior, conforme representado na Figura 38.

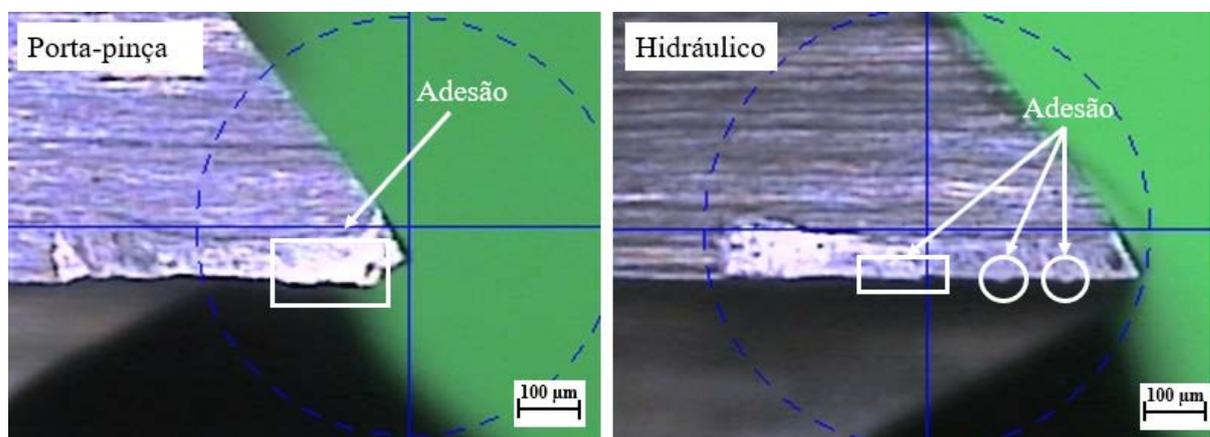
Figura 38 – Desgaste por lascamento



Fonte: O autor (2025)

A análise do desgaste por adesão revela que, na fixação por porta-pinça, houve formação concentrada de material aderido de grandes proporções, efeito associado à excentricidade elevada e à menor rigidez do sistema. Isso compromete o acabamento superficial e favorece a formação de aresta postiça. Em contrapartida, o sistema hidráulico apresentou adesões em menor quantidade e distribuídas em diferentes regiões da aresta, o que reflete um contato mais estável com a peça e menores níveis de vibração, conforme indicado na Figura 39.

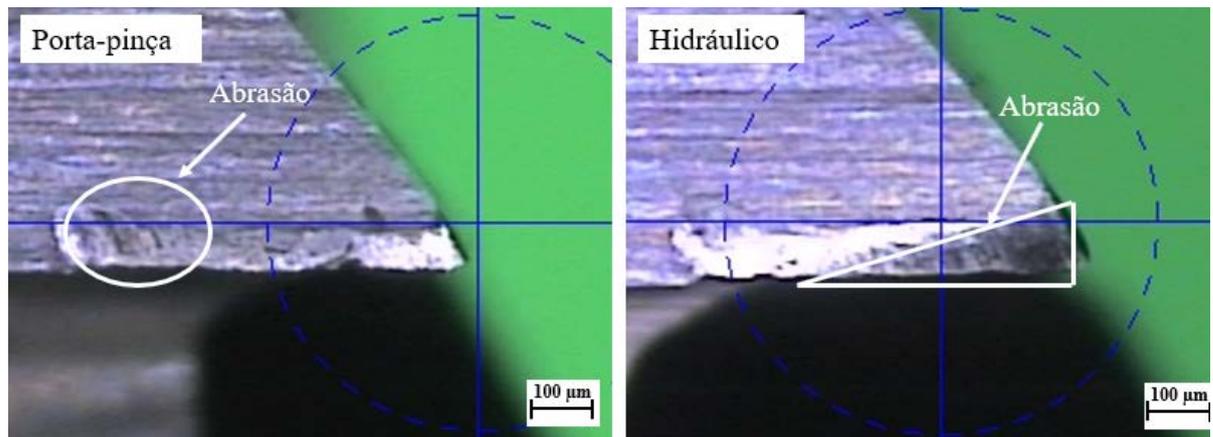
Figura 39 – Desgaste por adesão



Fonte: O autor (2025)

No modo de desgaste abrasivo, observou-se que a ferramenta fixada no porta-pinça sofreu desgaste concentrado em pontos específicos, indicando descontrole no contato entre ferramenta e peça, provavelmente causado por vibrações e falta de alinhamento. Em oposição, o desgaste na ferramenta do sistema hidráulico ocorreu de forma mais contínua ao longo da aresta de corte, o que sugere uma usinagem com maior regularidade e menor agressividade, como representado na Figura 40.

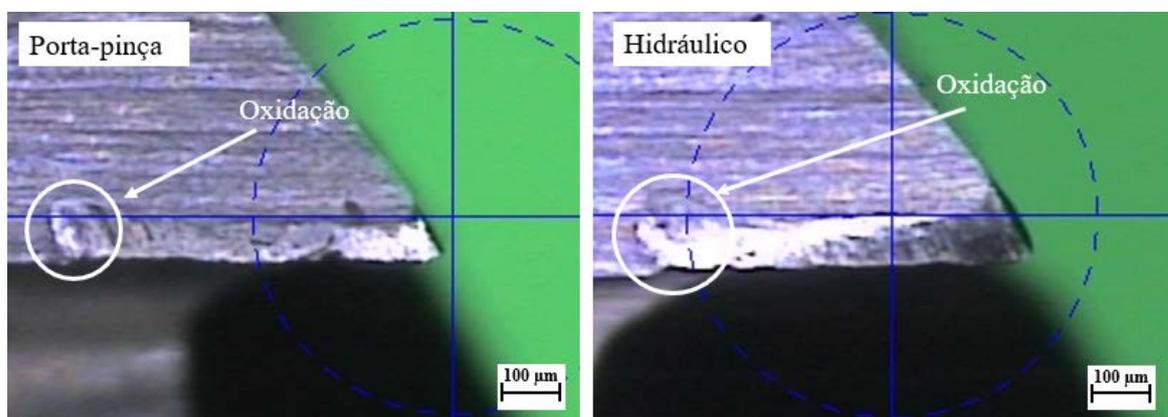
Figura 40 – Desgaste por abrasão



Fonte: O autor (2025)

Por fim, o desgaste por oxidação apresentou comportamento semelhante em ambos os sistemas de fixação, concentrando-se na extremidade da aresta de corte. Essa uniformidade nos resultados está relacionada ao uso dos mesmos parâmetros de corte e às condições do ambiente equivalentes durante os ensaios, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Desgaste por oxidação



Fonte: O autor (2025)

O comparativo visual nas figuras, permitiu avaliar os tipos e mecanismos de desgaste, alinhados com DINIZ et al. (2013), GROOVER (2013) e KLOCLE (2011), evidenciando os comportamentos na usinagem dos sistemas de fixações porta-pinça e hidráulico. Destacando nas figuras, o melhor desempenho do sistema hidráulico em relação ao porta-pinça.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo dos ensaios demonstram a superioridade técnica do sistema de fixação hidráulico em relação ao porta-pinça. A análise de desgaste revelou que o sistema hidráulico proporcionou um aumento de aproximadamente 51,1% na vida útil da ferramenta, evidenciando maior eficiência em termos de durabilidade. Essa vantagem está diretamente relacionada principalmente à menor excentricidade e também ao melhor balanceamento do conjunto, que resultaram em menores níveis de vibração e desgaste, como demonstrado nas análises.

Além disso, a caracterização dos tipos de desgaste reforça a maior estabilidade promovida pelo sistema hidráulico, com desgaste mais uniforme, menor incidência de lascamento e adesão, e menor severidade nos mecanismos de abrasão e oxidação. Tais fatores são determinantes para processos de usinagem de alta precisão, principalmente em aplicações industriais que exigem confiabilidade e repetibilidade.

Portanto, os dados obtidos neste trabalho validam o uso do sistema hidráulico como uma solução mais robusta para a fixação de ferramentas, além de fornecerem informações técnicas que sustentam sua escolha em ambientes produtivos que visam à redução de custos com ferramentas.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência do sistema de fixação da ferramenta sobre o desgaste durante o processo de usinagem em fresamento, comparando dois tipos: porta-piça e hidráulico. Por meio de ensaios experimentais, foi possível quantificar e analisar parâmetros essenciais como excentricidade, balanceamento, vibração e tipos de desgaste, fornecendo uma avaliação completa do desempenho de cada sistema.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema hidráulico apresentou desempenho superior em praticamente todos os aspectos avaliados. As ferramentas fixadas nos sistemas hidráulicos apresentaram menor desgaste de flanco (VB), maior uniformidade de desgaste, menor excentricidade e níveis mais baixos de vibração, o que se traduziu em um aumento de mais de 51% na vida útil da ferramenta em comparação ao porta-piça.

Esses dados corroboram com a literatura técnica e evidenciam a importância da escolha adequada do sistema de fixação para garantir a estabilidade do processo, a qualidade do produto final e a eficiência produtiva. Além disso, a análise detalhada dos tipos de desgaste mostrou que o sistema hidráulico oferece maior controle do processo e menor propensão a falhas severas, como lascamentos, adesão e oxidação concentrada.

Dessa forma, conclui-se que a adoção de sistemas de fixação hidráulicos é altamente recomendada para operações de fresamento que demandam alta precisão e confiabilidade, sendo um investimento justificável frente aos ganhos em desempenho, redução de custos com ferramentas e aumento na qualidade da usinagem. Ressalta-se, porém, que os resultados obtidos são válidos para as condições específicas dos testes realizados, como o tipo de material usinado, a ferramenta utilizada, os parâmetros de corte e o ambiente operacional, podendo variar em função de alterações nesses fatores.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o desempenho de outros tipos de sistemas de fixações, como os modelos térmicos e por interferência mecânica.

Avaliar ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos, a fim de verificar se os padrões de desgaste observados se mantêm sob outras condições de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTINTAS, Yusuf. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design**. 1 ed. New York: Cambridge University Press, 2000.

ALTINTAS, Yusuf; STEPAN, Gabor; BUDAK, Erhan; SCHMITZ, Tony; KILIC, Zekai Murat. **Chatter Stability of Machining Operations**. V. 142, ed. 11, 19 f. 11 agosto 2020. DOI <https://doi.org/10.1115/1.4047391>. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/crossmarkpolicy-asme>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ANTONIALLI, Armando Italo Sette. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1608940>. Acesso em: 13 nov. 2024.

BARRIOS, Daniel Benítez; PIVETTA, Luís Antonio; YOSHIKAMA, Néelson Kodi. **Mecânica: Métodos e Processos industriais**. 5 vol. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

BOOTHROYD, Geoffrey; KNIGHT, Winston A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 1989.

CAVICHIOLO, Francisco de Assis; VÁRIOS Autores; **Usinagem em Altíssimas Velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica**. 1d. São Paulo: Érica, 2003.

CHILDS, Thomas; MAEKAWA, Katsuhiko; OBIKAWA, Toshiyuki.; YAMANE, Yasou. **Metal Machining: Theory and Applications**. 1 ed. Great Britain: Arnold, 2000.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONTE, Francisco Carlo; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**. 5 ed. São Paulo: Artliber, 2006.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONTE, Francisco Carlo; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**. 8 ed. São Paulo: Artliber, 2013.

DMG MORI. CMX 600 V. Disponível em: <https://br.dmgmori.com/products/machines/milling/vertical-milling/cmx-v/cmx-600-v>. Acesso em: 02 out. 2024.

DUARTE, M. A. V. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações**. Apostila Didática. Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2005.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1977.

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo Processo de Usinagem e meios de controle**. 1 ed. Curitiba; Intersaberes, 2017. Biblioteca Virtual. Acesso em: 22 set. 2024.

GROOVER, Milkell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Material, Processes and Systems**. 5 ed. USA: John Wiley and Sons, 2013.

GUPTA, H. N.; GUPTA, R. C.; MITTAL, Arun. **Manufacturing Processes**. 2 ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2009.

Käfer. Relógios de medição. Disponível em: <https://www.kaefer-messuhren.de/index.php/mechanische-praezisionsmessuhren.html>. Acesso em: 08 junho 2025.

KLOCLE, Fritz. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2011.

KÖNIG, W.; KLOCLE, Fritzt. **Fertigungsverfahren Band 1**. Drehen, Fräsen, Bohren.6. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1997.

LACALLE, Norberto López; LAMIKIZ, Aitzol. **Machine Tools for High Performance Machining**. Springer-Verlag London Limited, 2009.

MACHADO, Álisson Rocha; COELHO, Reginaldo Teixeira; ABRÃO, Alexandre Mendes; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. São Paulo: Brúcher. 2011.

MAGALHÃES, Roberto; **Compreender e evitar ou reduzir vibrações durante a usinagem**. 2024, COMPRADO. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/compreender-e-evitar-ou-reduzir-vibracoes-durante-a-usinagem>. Acesso em: 13 nov. 2024.

MICKELSON, Dale; **Guide to Hard Milling and High Speed Milling**. 1 ed. New York: Industrial Press Inc, 2007.

MITUTOYO. Comparadores. Disponível em: https://www.mitutoyo.com.br/download/catalogogeral/p2019/26_comparadores.pdf. Acesso em: 13 nov. 2024.

NEVES, Davi. **Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférico**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1592703>. Acesso em: 9 nov. 2024.

OST, Charles Antonio. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, RS. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1426>. Acesso em: 05 out. 2024.

PIRES, Bruno Jorge. **Estudo das forças, vibrações e desgaste das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1614430>. Acesso em: 9 nov. 2024.

SANDVIK COROMANT. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt>. Acesso em: 02 out. 2024.

SECO TOOLS. Usinagem de precisão. Disponível em: <https://www.secotools.com/article/6?language=pt>. Acesso em: 05 out. 2024.

Schunk. Adaptadores de ferramentas. Disponível em:

https://schunk.com/br/en/tools/toolholder-quickfinder/c/PUB_5621. Acesso em: 02 junho 2025.

SILVA, Fábio Fernandes da. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de fresamento com Ferramenta de Topo Esférico do Aço AISI D6 endurecido.** 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3806>. Acesso em: 14 nov. 2024.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I.** 6 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II.** 3 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

Teknikao. Balanceador dinâmico. Disponível em:

<https://www.teknikao.com.br/produto/analise-balanceamento/nk600>. Acesso em: 08 junho 2025.

THORENZ, B., WESTERMANN, H. H., KAFARA, M., NÜTZEL, M., STEINHILPER, R. **Evaluation of the influence of different clamping chuck types on energy consumption, tool wear and surface qualities in milling operations.** Procedia Manufacturing 21, 575–582, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.158>. Acesso 15 nov. 2024.

Traction. Análise de vibração. Disponível em: <https://traction.com/sensor-de-vibracao-industrial/analise-de-vibracao>. Acesso em: 08 junho 2025.

WRIGHT, Paul; TRENT, Edward. **Metal Cutting.** 4 ed. Woburn EUA: Butterworth–Heinemann, 2000.