

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

VINÍCIUS DOS SANTOS HENNIG

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO INTERNO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONSTRUÇÃO E AMORTECIMENTO DE
FERRAMENTAS**

CAXIAS DO SUL
2026

VINÍCIUS DOS SANTOS HENNIG

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO INTERNO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONSTRUÇÃO E AMORTECIMENTO DE
FERRAMENTAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
para obtenção de grau de Engenheiro
mecânico.

Orientador: Prof.: Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2026

VINÍCIUS DOS SANTOS HENNIG

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO INTERNO
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONSTRUÇÃO E AMORTECIMENTO DE
FERRAMENTAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
para obtenção de grau de Engenheiro
mecânico.

Orientador: Prof.: Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

Aprovado em: __ de _____ de ____

Banca examinadora:

Prof. Orientador Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Me. Eng. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Pesquisador Me. Eng. Luccas Augusto Pedrassani Delgado
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e incentivo, e aos meus amigos, que estiveram presentes ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela saúde, força e perseverança durante toda a minha trajetória acadêmica.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela orientação, empenho e sabedoria transmitida, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

À empresa Susin Francescutti, pela chance de realizar este trabalho e pelo apoio fornecido durante sua execução. Ao gerente Eduardo B. Lazzarotto, em particular, por seu suporte e confiança.

À empresa Sandvik, pela assistência no fornecimento de ferramentas. Em particular, a Ismael Rombaldi, por seu apoio e contribuição ao longo da realização deste trabalho.

Ao Eng. Robson Dalpiaz e ao Eng. Maike Leite Pontes, por seu suporte, incentivo e colaboração ao longo deste período.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

*“Sem dados, você é apenas mais
uma pessoa com opinião.”*

William Edwards Deming

RESUMO

A busca por maior qualidade superficial e estabilidade nos processos de usinagem tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas com diferentes características construtivas e sistemas de amortecimento para redução de vibrações. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência das características construtivas e do amortecimento de ferramentas no acabamento obtido no torneamento interno. Para isso, foram analisadas três ferramentas distintas: uma ferramenta standard, uma ferramenta com corpo temperado por indução e uma ferramenta antivibratória do tipo *Silent Tools*TM. Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem Mazak Integrex 300-III, utilizando aço SAE 1080 como material de referência e mantendo constantes os parâmetros de corte. A qualidade superficial foi avaliada por meio da medição dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz, além dos parâmetros de ondulação Wa e Wz, utilizando um rugosímetro Mahr MarSurf GD 25. Cada amostra foi medida três vezes, sendo considerada a média dos valores obtidos, com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados. Os resultados demonstraram que a ferramenta standard apresentou os maiores valores de rugosidade e ondulação, indicando maior suscetibilidade a vibrações e instabilidade dinâmica durante o processo de usinagem. A ferramenta temperada apresentou o melhor desempenho global, com baixos níveis de rugosidade e ondulação, evidenciando maior estabilidade do sistema. Já a ferramenta *Silent Tools*TM apresentou os menores valores de rugosidade média, indicando excelente acabamento em microescala, porém com valores intermediários de ondulação, o que sugere limitações no controle de vibrações de baixa frequência. A análise dos resultados evidenciou que a rugosidade, isoladamente, não é suficiente para caracterizar completamente a qualidade da superfície usinada, tornando necessária a avaliação conjunta dos parâmetros de ondulação. Dessa forma, conclui-se que o desempenho das ferramentas está diretamente relacionado à sua capacidade de controlar vibrações, sendo o equilíbrio entre rigidez estrutural e amortecimento o fator determinante para a obtenção de melhores resultados no torneamento interno.

Palavras-chave: Torneamento interno; Qualidade superficial; Vibração; Amortecimento

ABSTRACT

The pursuit of higher surface quality and greater stability in machining processes has driven the development of tools with different design characteristics and vibration-damping systems. In this context, the present study aimed to evaluate the influence of tool design characteristics and damping capacity on the surface finish obtained in internal turning operations. For this purpose, three different tools were analyzed: a standard tool, an induction-hardened tool body, and a Silent Tools™ anti-vibration tool. The experiments were carried out on a Mazak Integrex 300-III machining center using SAE 1080 steel as the reference material, while maintaining constant cutting parameters. Surface quality was evaluated through the measurement of roughness parameters R_a and R_z , as well as waviness parameters W_a and W_z , using a Mahr MarSurf GD 25 roughness tester. Each sample was measured three times, and the average value was considered in order to increase the reliability of the results. The results showed that the standard tool presented the highest roughness and waviness values, indicating greater susceptibility to vibrations and dynamic instability during the machining process. The induction-hardened tool exhibited the best overall performance, with low levels of roughness and waviness, demonstrating greater system stability. The Silent Tools™ tool presented the lowest average roughness values, indicating excellent surface finish at the microscale; however, it showed intermediate waviness values, suggesting limitations in controlling low-frequency vibrations. The analysis of the results demonstrated that roughness alone is not sufficient to fully characterize the quality of a machined surface, making the combined evaluation of waviness parameters necessary. Therefore, it can be concluded that tool performance is directly related to its ability to control vibrations, with the balance between structural rigidity and damping being the determining factor for achieving better results in internal turning operations.

Keywords: Internal turning; Surface quality; Vibration; Damping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Tipos de Torneamento.....	19
Figura 2 — Temperatura no corte no processo de usinagem	21
Figura 3 — Torneamento interno longitudinal (1) e o torneamento de perfil (2).	25
Figura 4 — Textura superficial de uma superfície usinada observada por ampliação óptica..	29
Figura 5 — Formação geométrica da rugosidade superficial em função do avanço da ferramenta.....	30
Figura 6 — Mazak Integrex 300-III.....	33
Figura 7 — Rugosímetro Mahr	34
Figura 8 — Ferramentas utilizadas no experimento.....	36
Figura 9 — Broca intercambiável.....	37
Figura 10 — Balanço ferramenta 1 e 2.....	38
Figura 11 — Balanço <i>Silent Tools</i> TM	39
Figura 12 — Faceamento e furação	40
Figura 13 — Preset Zoller.....	41
Figura 14 — Inserto das ferramentas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	42
Figura 15 — Fixação amostra	43
Figura 16 — Processo de usinagem das ferramentas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	44
Figura 17 — Fluxograma da proposta	46
Figura 18 — Variações das medições da amostra 4 por ferramenta (<i>Box plot</i>).....	49
Figura 23 — Análise de textura da Ferramenta 1.....	57
Figura 24 — Análise de textura da Ferramenta 2.....	58
Figura 25 — Análise de textura da Ferramenta 3.....	58
Figura 26 — Vista do inserto 1 após usinagem.....	59
Figura 27 — Vista do inserto 2 após usinagem.....	60
Figura 28 — Vista do inserto 3 após usinagem.....	60
Figura 29 — Fotos do flanco.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1080 utilizado nos ensaios.....	35
Tabela 2 – <i>Preset</i> ferramentas	42
Tabela 3 – Sequência dos ensaios experimentais realizados	43
Tabela 4 – Resumo dos valores médios das medições das três ferramentas	47
Tabela 5 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 1	48
Tabela 6 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 2	48
Tabela 7 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 3	48
Tabela 8 – Rigidez relativa das três ferramentas	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ap	Profundidade de corte (<i>axial depth of cut</i>)
Cermet	Cerâmica + metal
Chatter	Vibração autoexcitada
CNC	Comando numérico computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
E	Módulo de elasticidade (<i>Elastic modulus</i>)
f	Avanço (<i>Feed rate</i>)
GPa	Gigapascal
HV	Dureza Vickers (<i>Hardness Vickers</i>)
I	Momento de inércia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K	Rigidez à flexão (<i>Flexural stiffness</i>)
L/D	Relação comprimento/diâmetro (<i>Length/Diameter</i>)
m/min	Metros por minuto
MDI	Interface de furação modular (<i>Modular Drilling Interface</i>)
mm	Milímetro
mm/r	Milímetro por rotação
MPa	Megapascal
Ra	Rugosidade média aritmética
Rsk	Assimetria do perfil de rugosidade

Rz	Rugosidade máxima média do perfil
r	Raio de ponta da ferramenta
Vc	Velocidade de corte
Wa	Ondulação média aritmética
Wz	Altura máxima da ondulação
VB	Largura do desgaste de flanco (<i>Flank Wear Width</i>)
VBmax	Largura máxima da marca de desgaste de flanco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	USINAGEM.....	17
2.2	TORNEAMENTO INTERNO	18
2.2.1	Parâmetros de corte.....	20
2.3	VIBRAÇÃO EM USINAGEM	21
2.3.1	Barras antivibratórias <i>Silent Tools</i> ™ e aplicações no torneamento interno.....	24
2.4	QUALIDADE SUPERFICIAL	27
2.4.1	Textura Superficial.....	28
2.4.2	Rugosidade	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	33
3.2	MATERIAL DO CORPO DE PROVA.....	34
3.3	FERRAMENTAS	36
3.4	MÉTODO DO EXPERIMENTO	37
3.4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	40
3.4.2	PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS	41
3.4.3	USINAGEM DAS AMOSTRAS	42
3.5	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E TEXTURA	45
3.6	FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DA PROPOSTA	45
4	RESULTADOS	47
4.1	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	47
4.2	ANÁLISE VISUAL DA TEXTURA	56
4.3	ANÁLISE DE RIGIDEZ	62

5	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68
	ANEXO A – ANÁLISE QUÍMICA.....	72
	ANEXO B- CERTIFICADO DE NORMALIZAÇÃO	73
	ANEXO C- CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO.....	74
	ANEXO D – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 1	75
	ANEXO E – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 2	80
	ANEXO F – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 3	85
	ANEXO G – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 1 ...	90
	ANEXO H – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 2 ...	91
	ANEXO I – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 3	92

1 INTRODUÇÃO

A indústria metalmeccânica tem como base os processos de usinagem, que são responsáveis pela transformação de material bruto em produtos manufaturados. Dentre esses processos, destaca-se o torneamento interno, no qual a precisão dimensional e a qualidade superficial são pontos importantes. No entanto, a ocorrência de vibrações durante o processo de corte, principalmente em ferramentas com uma alta relação diâmetro/comprimento, compromete significativamente a estabilidade da ferramenta, assim ocasionando vibrações e, consequentemente, um acabamento indesejado (Lara, 2017).

As vibrações durante o torneamento interno são causadas por diversos fatores, como a falta de rigidez da ferramenta ou do suporte, ou até mesmo pelos parâmetros de corte utilizados. Essas vibrações podem causar um desgaste excessivo na ferramenta, resultando na redução da sua vida útil e em um acabamento ruim (Santos, 2015). A qualidade superficial, medida pela rugosidade, é um dos indicadores da integridade da peça e influencia o seu desempenho funcional (Nunes, 2011).

Diversas estratégias têm sido propostas para evitar os efeitos das vibrações durante a usinagem. Entre elas, destaca-se a utilização de ferramentas com rigidez maior, ajustes nas condições de corte e a utilização de sistemas de amortecimento, passivos ou ativos. Tais estratégias procuram minimizar as vibrações, assim melhorando a estabilidade da usinagem e consequentemente a qualidade superficial (Couto, 2021).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da construção e do amortecimento de ferramentas de torneamento interno sobre o acabamento obtido, comparando diferentes ferramentas: uma *standard*, uma com corpo temperado por indução e uma *Silent Tools™*. Espera-se que os resultados contribuam para a otimização dos processos de usinagem, proporcionando melhorias na qualidade das peças produzidas.

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de minimizar tempo e melhorar a qualidade superficial das peças é uma tendência crescente na indústria. Assim, a busca por ferramentas que atendam a essas expectativas é de extrema importância. A escolha da ferramenta e da estratégia de usinagem influencia diretamente a viabilidade técnica e os custos do processo de fabricação.

No setor metalmeccânico, um dos grandes desafios está relacionado à vibração das ferramentas, especialmente em operações de torneamento interno. Esse fenômeno pode comprometer o acabamento da peça, reduzir a vida útil da ferramenta e, consequentemente, aumentar os custos operacionais. Segundo Cabau e Cossich (2015), a relação comprimento-diâmetro elevada das ferramentas de torneamento interno favorece o surgimento de vibrações indesejadas, tornando necessário o desenvolvimento de soluções que minimizem esses efeitos.

Ainda, é possível verificar o impacto na produtividade, pois, de acordo com Digernes (2024), a aplicação das *Silent Tools*TM permite ganhos de produtividade que variam de 50% a 300%, dependendo do comprimento do adaptador e das condições de corte.

Portanto, o presente estudo se justifica pela necessidade de análise e comparação de três ferramentas para torneamento interno com diferentes características de construção e amortecimento. Desta forma, ao contribuir para a compreensão do comportamento dinâmico das ferramentas esta pesquisa não tem apenas relevância acadêmica, mas também importância prática para a indústria, pois pode oferecer alternativas para melhorar o acabamento, prolongar a vida útil das ferramentas e otimizar a produção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito de amortecimento de três conceitos de ferramentas sobre a qualidade superficial.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o acabamento, por meio da medição dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz, obtido no torneamento interno com três diferentes ferramentas: uma ferramenta standard, uma ferramenta com corpo temperado por indução e uma ferramenta antivibratória *Silent Tools*TM.
- Avaliar a textura superficial resultante, por meio de imagens, da amostra para as diferentes ferramentas.

- Identificar a configuração de ferramenta que resulta na melhor qualidade superficial e estabilidade operacional no torneamento interno.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINAGEM

A usinagem constitui um dos pilares fundamentais da manufatura, compreendendo um conjunto de processos de conformação mecânica que conferem forma, dimensões e acabamento a uma peça pela remoção progressiva de material na forma de cavaco (Groover, 2020). Esses processos, classificados como de fabricação subtrativa, são empregados quando se exigem elevada precisão dimensional e acabamento de qualidade, sendo essenciais nas indústrias aeronáutica, automotiva e de moldes, entre outras (Kalpakjian e Schmid, 2014).

De acordo com Klocke (2011), a usinagem deve ser compreendida como um sistema integrado envolvendo máquina-ferramenta, ferramenta de corte, peça e condições de processo. A qualidade final da peça resulta da interação entre esses elementos, sendo influenciada simultaneamente por aspectos geométricos, térmicos e dinâmicos. Dessa forma, a obtenção de superfícies com elevada qualidade exige não apenas a seleção adequada dos parâmetros de corte, mas também o controle das vibrações e deformações elásticas presentes durante a remoção de material.

A base física da usinagem reside na plasticidade e no cisalhamento do material. Durante o corte, a ferramenta, mais dura e resistente que a peça, promove uma deformação plástica localizada que ultrapassa a capacidade de resistência do material, resultando no cisalhamento de uma camada pré-determinada – o cavaco (Trent e Wright, 2000). A eficiência desse processo é governada pela interação complexa entre três elementos principais: a peça, a ferramenta de corte e a máquina-ferramenta, que em conjunto definem a viabilidade técnica e econômica da operação (Cetlin e Helman, 2018).

A seleção dos parâmetros de corte, velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) – é crítica para o sucesso da operação. A velocidade de corte, em particular, é o fator que mais influencia a geração de calor e o desgaste da ferramenta. Já o avanço está diretamente relacionado à espessura do cavaco e à rugosidade superficial resultante, enquanto a profundidade de corte define a taxa de remoção de material e os esforços envolvidos (ABNT NBR ISO 3685, 1993). A otimização desses parâmetros busca um equilíbrio entre produtividade, custo da ferramenta e qualidade do produto final.

Dentre a vasta gama de processos de usinagem, o torneamento se destaca por sua versatilidade e ampla aplicação. Realizado primariamente em tornos, caracteriza-se pelo

movimento de rotação da peça e pelo movimento de avanço da ferramenta, permitindo a usinagem de superfícies cilíndricas, cônicas e planas (Ferraresi, 2018). O torneamento interno, foco deste trabalho, é uma variante específica destinada à ampliação e ao acabamento de furos pré-existentes, apresentando desafios únicos devido ao confinamento da ferramenta, aos longos balanços e à dificuldade de escoamento de cavacos (Sandvik Coromant, 2024).

O desempenho do processo de usinagem é constantemente desafiado por fenômenos dinâmicos, como as vibrações. A "*flutter*" ou vibração autoexcitada é um dos problemas mais recorrentes, podendo causar instabilidade no corte, aumento do desgaste da ferramenta e degradação do acabamento da peça (Rao, 2011). O controle dessas vibrações, seja por meio do projeto de ferramentas mais rígidas, da adoção de sistemas de amortecimento ou do ajuste dos parâmetros de corte, é, portanto, uma premissa para a usinagem de precisão.

Por fim, a qualidade da superfície usinada, frequentemente quantificada pela rugosidade, não é meramente uma característica estética, mas um indicador crítico da integridade superficial. Ela influencia diretamente propriedades funcionais como a resistência à fadiga, a capacidade de vedação e o comportamento ao desgaste do componente (Gonçalves Júnior *et al.*, 2015). Dessa forma, a análise do acabamento torna-se um procedimento indispensável para a validação de qualquer processo de usinagem, servindo como um termômetro da sua estabilidade e eficiência.

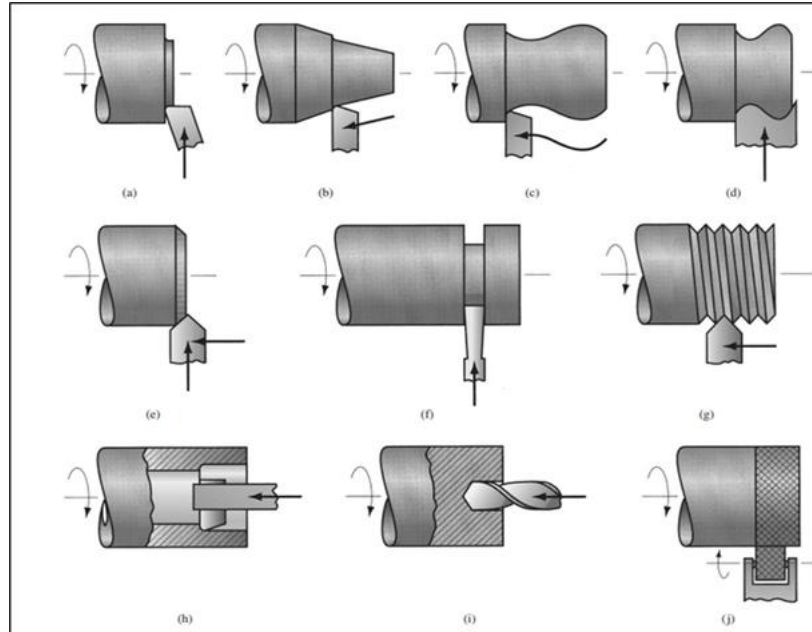
2.2 TORNEAMENTO INTERNO

O torneamento é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria, responsável por conferir a forma final a uma ampla variedade de peças. Quando se deseja aumentar o diâmetro interno de um componente já furado, utiliza-se o torneamento interno, no qual a peça previamente perfurada é submetida a essa operação para atingir as dimensões desejadas.

Segundo Ferraresi (1977), o torneamento pode ser descrito como o processo destinado a obter superfícies redondas com a utilização de uma ou mais ferramentas. Para isso, a peça gira no eixo da máquina e a ferramenta se desloca em sua direção, assim efetuando o corte. Assim para Groover (2011), o torneamento pode ser classificado em diferentes operações, como torneamento externo, interno, faceamento e rosqueamento, sendo cada uma delas destinada a diferentes finalidades, como pode ser visto na Figura 1. A eficiência do processo, a vida útil da ferramenta e a qualidade da peça final dependem diretamente da escolha correta

de parâmetros de corte, como velocidade, avanço e profundidade de corte. (Machado *et al.*, 2017).

Figura 1 — Tipos de Torneamento



Fonte: Adaptado de Groover (2020).

A ferramenta de corte é um componente fundamental no processo de usinagem e a sua escolha, juntamente com a estratégia de usinagem, influencia diretamente a viabilidade técnica e os custos de fabricação (Machado *et al.*, 2017). Este processo, devido à presença de longos balanços e à dificuldade de escoamento de cavacos, apresenta uma elevada propensão a deflexões e vibrações (Sandvik Coromant, 2024b).

Segundo Stemmer (2005), o desempenho do processo de usinagem está diretamente relacionado à interação entre geometria da ferramenta, material usinado e condições operacionais empregadas. Em operações de torneamento interno, a elevada relação comprimento/diâmetro da barra de mandrilar reduz significativamente a rigidez do sistema, aumentando sua suscetibilidade a deflexões e vibrações. Nessas condições, pequenas variações nas forças de corte podem resultar em instabilidades dinâmicas capazes de comprometer a precisão dimensional e a qualidade superficial da peça.

Conforme o comprimento da peça é necessário o emprego de ferramentas longas, de acordo com Lara (2017), ferramentas com uma alta relação diâmetro/comprimento, compromete significativamente a estabilidade. Considerando que a vibração está diretamente

relacionada ao processo de torneamento, torna-se necessário avaliar os conceitos envolvidos e compreender melhor os parâmetros operacionais, de modo a entender seu impacto na intensidade desse fenômeno.

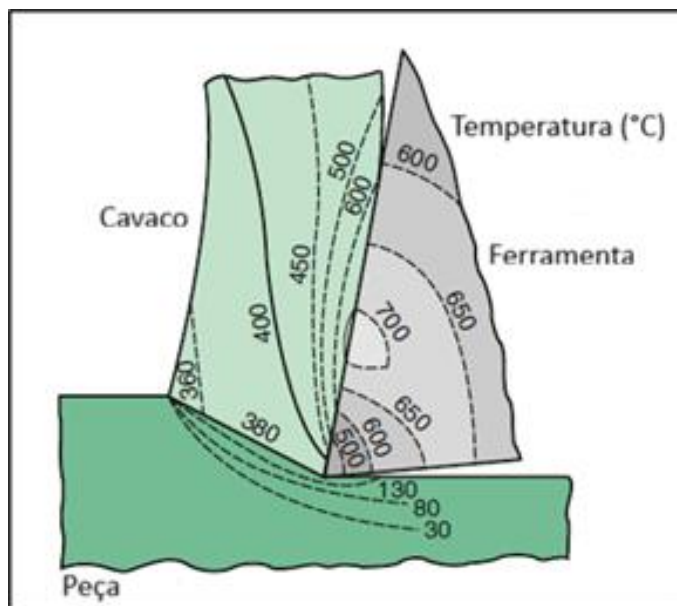
Ferramentas convencionais especialmente em operações de torneamento interno, podem ter sua estabilidade comprometida significativamente quando a relação diâmetro/comprimento (L/D) é alta (Lara, 2017). Este fenômeno ocorre porque o aumento do balanço da ferramenta reduz sua rigidez estática, tornando-a mais suscetível a deflexões elásticas sob a ação das forças de usinagem. Segundo Altintas (2012), a rigidez de uma viga em balanço, modelo que representa essa ferramenta, é inversamente proporcional ao cubo do comprimento, o que explica a sensibilidade crítica do sistema a aumentos no balanço.

Dessa forma, o torneamento estabelece-se como um processo de usinagem versátil e fundamental, cuja eficácia depende não apenas da correta execução dos movimentos relativos entre peça e ferramenta, mas também de uma compreensão profunda de suas variantes operacionais. A seleção criteriosa da operação, seja ela torneamento externo, interno, faceamento ou rosqueamento, é o primeiro passo para assegurar a conformidade dimensional e geométrica da peça. No entanto, a máxima eficiência do processo só é alcançada quando essa seleção é complementada pela definição precisa dos fatores que governam a remoção de material no corte. É nesse contexto que os parâmetros de corte assumem um papel de extrema relevância, atuando como as variáveis de controle que diretamente influenciam a produtividade, a vida da ferramenta e, crucialmente, a qualidade final do produto.

2.2.1 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte constituem variáveis fundamentais que definem o comportamento do processo de torneamento. A velocidade de corte afeta diretamente a geração de calor e o desgaste da ferramenta, sendo um dos fatores mais críticos para a vida útil da aresta (Kalpakjian e Schmid, 2014), como é mostrado na Figura 2. Já o avanço é o parâmetro relacionado ao acabamento, pois regula a espessura do cavaco e a distância entre marcas consecutivas deixadas pela ferramenta sobre a peça. Já a profundidade de corte influencia principalmente na taxa de remoção de material e os esforços de usinagem, impactando na potência requerida e na estabilidade do processo (Trent e Wright, 2000).

Figura 2 — Temperatura no corte no processo de usinagem



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2014).

Segundo a norma ISO 3685 (1993), a definição adequada dos parâmetros deve equilibrar produtividade, qualidade dimensional e vida da ferramenta. Combinações inadequadas, como avanços elevados associados a altas profundidades de corte, podem levar a vibrações excessivas, perda do controle dimensional e degradação do acabamento. Por outro lado, parâmetros bem ajustados permitem aumentar a eficiência da produção e garantir melhor desempenho funcional ao componente usinado.

2.3 VIBRAÇÃO EM USINAGEM

No contexto da usinagem, a vibração representa um fenômeno dinâmico presente em sistemas mecânicos submetidos a movimento e carregamentos variáveis, sendo seu estudo essencial para a compreensão da estabilidade operacional, da qualidade superficial e do desempenho das máquinas-ferramenta.

Conforme explica Rao (2011), a maioria das atividades humanas envolve vibração de uma forma ou de outra, o que inclui desde fenômenos biológicos até sistemas físicos e estruturas industriais. No contexto das máquinas-ferramenta, esse fenômeno é inevitável e,

quando não controlado, pode comprometer o desempenho, a precisão e o acabamento das peças fabricadas.

O fenômeno da ressonância ocorre sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincidir com a frequência da excitação externa, levando a deflexões excessivas e falha (Rao, 2011). Em termos práticos, quando a ferramenta de corte entra em ressonância com as forças dinâmicas geradas durante o processo, surgem oscilações indesejadas conhecidas como *chatter*, responsáveis por marcas periódicas e padrões ondulados no material, resultando em acabamento de baixa qualidade. Além disso, essas vibrações provocam desgaste mais rápido de peças de máquina como rolamentos e engrenagens e também geram ruído excessivo, comprometendo a integridade do sistema de usinagem como um todo (Rao, 2011).

Segundo Klocke (2011), as vibrações constituem uma das principais limitações para a produtividade em processos de corte de metais. Além de comprometerem a vida útil das ferramentas, as vibrações afetam diretamente a integridade superficial da peça e restringem os parâmetros de corte que podem ser empregados de forma estável. Por esse motivo, o desenvolvimento de sistemas capazes de aumentar a rigidez ou o amortecimento do conjunto de usinagem tem recebido crescente atenção na indústria moderna.

Tönshoff e Denkena (2013) apontam que a estabilidade dinâmica do processo de usinagem é um dos fatores mais importantes para a obtenção de elevada qualidade superficial. Segundo os autores, vibrações autoexcitadas provocam alterações periódicas na espessura do cavaco e nas forças de corte, gerando marcas características na superfície e acelerando o desgaste da ferramenta. Como consequência, observa-se aumento dos parâmetros de rugosidade e redução da precisão dimensional da peça.

O controle de vibrações no processo de usinagem é um desafio central para a garantia de precisão dimensional e qualidade superficial. De forma genérica, os sistemas de amortecimento podem ser classificados em duas grandes categorias: amortecimento passivo e amortecimento ativo. O amortecimento passivo utiliza elementos mecânicos ou materiais que dissipam energia vibratória sem necessidade de fontes de energia externas ou controle em tempo real. Já o amortecimento ativo envolve sensores, atuadores e um sistema de controle que responde ativamente às vibrações detectadas, aplicando forças de cancelamento (Prado, 2019).

Dentre as soluções passivas, uma das mais difundidas é a tecnologia de barras com absorvedor dinâmico sintonizado. Este sistema baseia-se no princípio de que uma massa

secundária (um contrapeso), devidamente calibrada e acoplada ao sistema principal, pode ser sintonizada para vibrar em oposição de fase à vibração original, absorvendo e dissipando a energia cinética (Silva, 2020). Conforme descrito por Rao (2011), o uso de tais amortecedores "reduz as amplitudes de vibração e evita a ressonância do sistema", mantendo as deflexões dentro de limites seguros.

Outra abordagem passiva consiste no uso de materiais compósitos com alto coeficiente de amortecimento na construção do corpo da ferramenta ou de suportes. Estes materiais, muitas vezes baseados em polímeros ou estruturas sanduíche, convertem a energia mecânica da vibração em energia térmica, atenuando a oscilação (Machado *et al.*, 2017).

No âmbito do amortecimento ativo, sistemas mais complexos integram sensores de vibração e atuadores piezoelétricos ou eletromagnéticos. Estes sistemas monitoram continuamente o comportamento dinâmico da ferramenta e geram forças de controle em tempo real para suprimir as vibrações assim que são incipientes. Embora ofereçam desempenho superior em uma faixa mais ampla de frequências, seu custo e complexidade são significativamente maiores, limitando sua aplicação a operações de alto valor agregado (Pereira, 2022).

Um exemplo notório de implementação prática bem-sucedida do conceito de absorvedor dinâmico sintonizado no mercado são as ferramentas antivibratórias, cuja tecnologia surgiu de um projeto universitário na década de 1960. Nesta solução, um contrapeso interno é calibrado para absorver a energia cinética das vibrações e utilizar uma frequência de compensação para eliminá-las mecanicamente (Digernes, 2024). A introdução desse tipo de tecnologia permitiu aumentar significativamente os parâmetros de corte, como avanço e profundidade, sem comprometer a qualidade da superfície, resultando em maiores taxas de remoção de metal e acabamento de alta qualidade (Digernes, 2024).

Resultados semelhantes são reportados por Munoa *et al.* (2016), que destacam a utilização de absorvedores dinâmicos sintonizados como uma das estratégias mais eficazes para a redução de vibrações autoexcitadas (*chatter*) em operações de usinagem. Segundo os autores, a incorporação de mecanismos de amortecimento em barras de torneamento interno aumenta significativamente a estabilidade dinâmica do sistema, permitindo a utilização de maiores profundidades de corte e contribuindo para a melhoria do acabamento.

A evolução recente desses sistemas integra funcionalidades da Indústria 4.0, incorporando sensores para monitoramento digital de variáveis como carga, vibração, deflexão e temperatura. Esta integração fornece aos operadores uma visão em tempo real da

condição do processo, permitindo uma configuração mais precisa e a identificação proativa de problemas (Digernes, 2024).

A compreensão das forças e tensões que atuam durante o corte ortogonal de metais é essencial para explicar as causas de deflexão e vibração no torneamento interno. Essas forças resultam da interação entre a tensão de cisalhamento no plano de deformação e as tensões intensas na face de saída da ferramenta, principalmente em condições de aderência entre cavaco e a aresta cortante. A relação entre o ângulo do plano de cisalhamento, o comprimento de contato e a intensidade das forças determina o comportamento dinâmico do corte; ângulos de cisalhamento menores geram cavacos mais espessos, elevando as forças de corte e o potencial de instabilidade da ferramenta (Trent e Wright, 2000).

O aumento do comprimento de contato e da tensão de cisalhamento na interface cavaco-ferramenta intensifica as forças e favorece a deflexão, tornando indispensável o uso de soluções que aumentem a rigidez estrutural e amortecimento de vibrações. Tais medidas garantem melhor acabamento, precisão dimensional e maior vida útil da ferramenta, seja pelo controle da geometria da ferramenta, seja pela aplicação de dispositivos mecânicos antivibratórios (Trent e Wright, 2000).

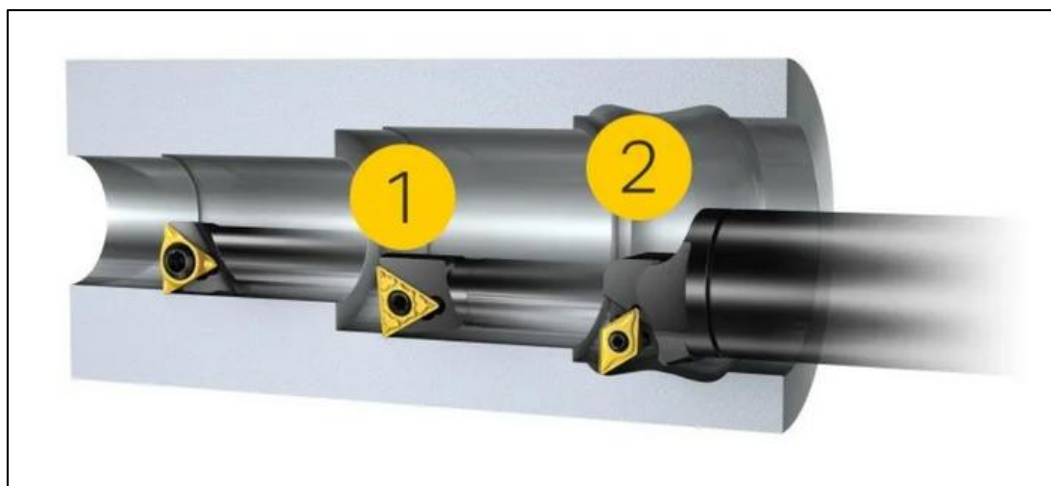
A seleção do sistema de amortecimento mais adequado depende de um balanço entre o custo, a complexidade operacional e os ganhos desejados em produtividade e qualidade. O entendimento desses diferentes princípios é fundamental para avaliar o seu impacto no acabamento. Silva, Peterka e Vopat (2023), ao avaliarem diferentes ferramentas para torneamento interno com elevados balanços, verificaram que o aumento da amplitude de vibração está diretamente associado à deterioração dos parâmetros de rugosidade, observando valores de R_a que passaram de aproximadamente $0,35 \mu\text{m}$ para $1,83 \mu\text{m}$ em condições instáveis de corte. Os autores também constataram que sistemas equipados com amortecedores dinâmicos apresentaram maior faixa de estabilidade operacional em comparação às barras convencionais.

2.3.1 Barras antivibratórias *Silent Tools*™ e aplicações no torneamento interno

As operações de torneamento interno são amplamente utilizadas na indústria metalmeccânica para a usinagem de superfícies cilíndricas internas. Contudo, devido à presença de longos balanços e à dificuldade de escoamento de cavacos, essa operação

apresenta uma elevada propensão a deflexões e vibrações. Segundo a Sandvik Coromant (2024b), os longos balanços e o escoamento de cavacos insuficiente são dois desafios na usinagem de torneamento interno, podendo causar acabamento insatisfatório e até mesmo a quebra do inserto.

Figura 3 — Torneamento interno longitudinal (1) e o torneamento de perfil (2).



Fonte: Sandvik Coromant (2024).

As limitações das ferramentas convencionais no controle de vibrações durante o torneamento interno impulsionaram o desenvolvimento das barras antivibratórias *Silent Tools™*, reconhecidas mundialmente por sua eficácia em estabilidade dinâmica. O conceito teve início na década de 1960, quando Hans Kristian Holmen desenvolveu, em sua tese universitária, um protótipo de barra de mandril antivibração, que posteriormente atraiu o interesse de uma fábrica local e, mais tarde, resultou em parceria com a Sandvik Coromant para expansão e aprimoramento da tecnologia (Digernes, 2024). Como relatado pelo autor, “as ferramentas *Silent Tools™* nasceram da ambição de um universitário. Em 1964, ao escrever sua tese sobre vibrações de ferramentas, Hans Kristian Holmen criou um conceito para uma barra de mandril antivibração [...] Desde então, a *Silent Tools™* está com a Sandvik Coromant, com constante crescimento da linha de produtos” (Digernes, 2024).

O princípio de funcionamento das *Silent Tools™* baseia-se em um sistema interno de amortecimento, composto por um contrapeso calibrado que atua em frequência oposta às vibrações da ferramenta, dissipando a energia cinética gerada e reduzindo o impacto sobre o processo de corte. Segundo Digernes (2024), ao inserir um contrapeso dentro da ferramenta,

este absorve a energia cinética das vibrações e usa uma frequência de compensação para eliminá-las mecanicamente. Essa solução permite operar com relações de balanço (L/D) muito superiores às das barras convencionais, sem comprometer o acabamento ou a precisão dimensional (Sandvik Coromant, 2024a). Para profundidades menores, barras maciças ainda são suficientes, mas em furos profundos a aplicação das *Silent Tools*TM torna-se indispensável.

A tecnologia também se integra a sistemas de refrigeração interna e cabeças de corte intercambiáveis, como o CoroTurn® SL, favorecendo o controle térmico e o escoamento de cavacos, o que contribui para maior estabilidade do corte e vida útil das pastilhas (Sandvik Coromant, 2024a). No torneamento interno, a escolha adequada da ferramenta, da geometria da pastilha e do ângulo de posição é crucial para reduzir forças radiais e axiais, minimizando a vibração. Recomenda-se o uso de insertos positivos, ângulos de posição entre 90° e 95° e formatos triangulares ou tipo D (55°) para acessibilidade, enquanto pastilhas C (80°) oferecem maior resistência da aresta (Sandvik Coromant, 2024b). Em operações de perfilamento interno, ângulos de folga de pelo menos 7° evitam contato indesejado entre a pastilha e a parede do furo, promovendo acabamento uniforme e estabilidade.

A aplicação das *Silent Tools*TM permite ganhos de produtividade que variam de 50% a 300%, dependendo do comprimento do adaptador e das condições de corte (Digernes, 2024). Esses resultados decorrem da possibilidade de operar com parâmetros de corte mais agressivos sem perda de qualidade dimensional, redução de ruído, melhor escoamento de cavacos e menor fadiga da ferramenta, garantindo um processo mais seguro e econômico. Recentemente, a Sandvik Coromant lançou a linha *Silent Tools Plus*TM, incorporando sensores inteligentes e o Verificador de Status da Ferramenta, que monitoram integridade, vibração, temperatura e deflexão em tempo real. Conforme o autor, “com o *Silent Tools Plus*TM, os operadores podem monitorar carga, vibração, deflexão, acabamento e temperatura [...] fornecendo uma visão da zona de corte e permitindo identificar problemas antes que causem refugos” (Digernes, 2024, p. 5).

A evolução das *Silent Tools*TM evidencia a combinação de mecânica de precisão, engenharia de materiais e tecnologia digital, permitindo o controle eficaz das vibrações, melhor acabamento, maior durabilidade da ferramenta e redução de custos operacionais. Dessa forma, as barras antivibratórias consolidam-se como uma das principais inovações no torneamento interno moderno, garantindo produtividade e precisão alinhadas aos padrões industriais contemporâneos.

2.4 QUALIDADE SUPERFICIAL

A qualidade superficial é um dos parâmetros mais críticos para avaliar a qualidade de peças usinadas, exercendo influência direta no desempenho mecânico, resistência à fadiga, comportamento tribológico e vida útil do componente (ABNT NBR ISO 1302, 2018). Em processos de torneamento, a rugosidade resultante é determinada por uma complexa interação entre parâmetros de corte, geometria da ferramenta, características do material e condições dinâmicas do processo.

A rugosidade superficial, geralmente quantificada pelos parâmetros Ra (rugosidade média aritmética) e Rz (rugosidade média da altura entre picos e vales), constitui a manifestação primária do acabamento. Segundo Groover (2020), o avanço (f) é o parâmetro que exerce influência mais direta na rugosidade teórica, uma vez que determina o espaçamento entre as marcas consecutivas deixadas pela ferramenta na superfície da peça. A relação teórica entre avanço e rugosidade pode ser expressa pela equação de rugosidade ideal para ferramentas de ponta arredondada, onde:

$$Ra \approx \frac{f^2}{8 \times r} \quad (1)$$

Onde r é o raio de ponta da ferramenta. Além dos parâmetros de corte convencionais - velocidade de corte (Vc), avanço (f) e profundidade de corte (ap) - estudos demonstram que fenômenos dinâmicos como vibrações têm impacto significativo na qualidade superficial. As vibrações durante o processo de usinagem, particularmente as do tipo "*chatter*" ou autoexcitadas, geram padrões ondulatórios regulares na superfície usinada, comprometendo severamente a integridade superficial (Altintas, 2012).

A influência do desgaste da ferramenta no acabamento foi estudada por Gonçalves Júnior *et al.* (2015) em pesquisas com materiais cerâmicos. Em seu estudo sobre torneamento de alumina a verde, os autores constataram que, embora a profundidade de corte alterasse as forças de usinagem, não influenciava significativamente a rugosidade superficial, enquanto a velocidade de corte e o avanço mostraram-se parâmetros determinantes para a qualidade final. Condições inadequadas de corte, especialmente avanços excessivos, provocaram danos superficiais severos caracterizados por destacamentos de aglomerados do material.

A relação entre estratégia de usinagem e acabamento foi igualmente investigada por Cheung e Lee (2018), que analisaram a influência do número de passes na qualidade final. Seus resultados corroboram os achados de Gonçalves Júnior *et al.* (2015), indicando que o aumento no número de passes necessários para remover determinado volume de material, quando se utiliza profundidades de corte reduzidas, intensifica o desgaste da ferramenta e consequentemente degrada a rugosidade superficial. Esta constatação reforça a importância de se buscar estratégias que minimizem o número de passes sem comprometer a estabilidade do processo.

Para materiais metálicos, a formação do cavaco e seu escoamento adequado representam fatores adicionais que impactam o acabamento. Segundo Astakhov (2018), cavacos mal controlados podem causar marcações na superfície usinada, enquanto o uso de geometrias de ferramenta otimizadas e parâmetros de corte adequados promove a formação de cavacos curtos que se desprendem facilmente, preservando a integridade superficial.

A medição e caracterização do acabamento evoluíram significativamente nas últimas décadas, com a introdução de parâmetros tridimensionais que proporcionam uma avaliação mais abrangente da textura superficial. A norma ABNT NBR ISO 25178 (2019) estabelece parâmetros para a caracterização da textura superficial baseada em dados de área, permitindo uma correlação mais precisa entre características superficiais e desempenho funcional.

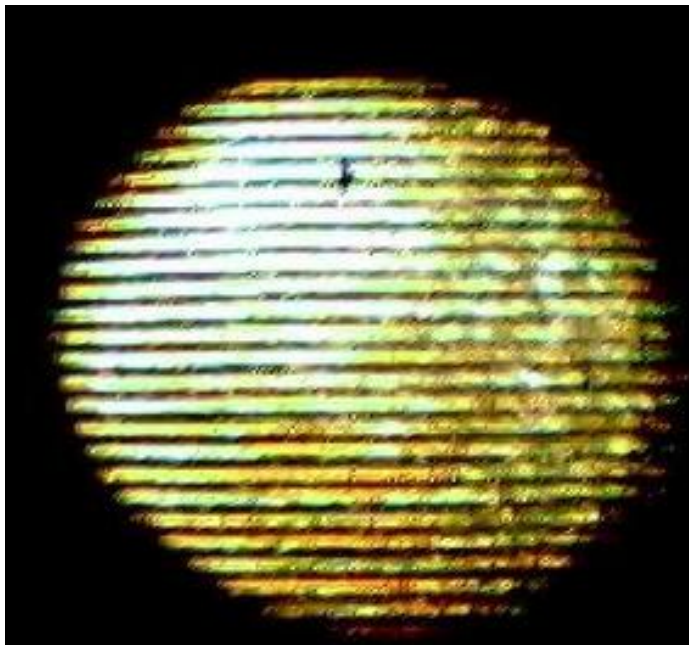
O controle efetivo do acabamento em operações de torneamento interno, portanto, requer não apenas a seleção adequada de parâmetros de corte, mas também a consideração de aspectos dinâmicos do processo, características tribológicas do par ferramenta-material e estratégias de usinagem otimizadas. Esta compreensão integrada possibilita a obtenção de superfícies que atendam aos requisitos funcionais dos componentes, assegurando desempenho confiável em serviço.

2.4.1 Textura Superficial

A textura superficial compreende o conjunto de irregularidades presentes na superfície de uma peça usinada, constituindo-se como um dos principais indicadores de qualidade final do componente. Segundo a norma ABNT NBR ISO 25178-1 (2019), a textura pode ser caracterizada por diferentes componentes, incluindo rugosidade, ondulações e defeitos superficiais. A rugosidade superficial representa as imperfeições de menor escala, oriundas diretamente da interação entre ferramenta e peça durante o processo de usinagem

(Whitehouse, 2012). Já as ondulações, classificadas como textura secundária, consistem em desvios regulares de caráter periódico que se sobrepõem à rugosidade principal (Figura 4).

Figura 4 — Textura superficial de uma superfície usinada observada por ampliação óptica



Fonte: Campos Rubio e Velten Filho (2003)

De acordo com Gadelmawla (2020), essas ondulações frequentemente têm origem em deflexões do sistema máquina-ferramenta-peça ou em vibrações durante o processo de usinagem, podendo comprometer significativamente a funcionalidade do componente.

2.4.2 Rugosidade

A rugosidade superficial configura-se como a manifestação primária da textura superficial, consistindo em imperfeições de pequena escala que surgem inevitavelmente durante o processo de usinagem. Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR ISO 4287 (2017), sua quantificação é realizada por meio de parâmetros como a Rugosidade Média Aritmética (R_a) e a Rugosidade Média da Altura entre Picos e Vales (R_z), que servem como indicadores diretos da integridade superficial e do desempenho funcional da peça.

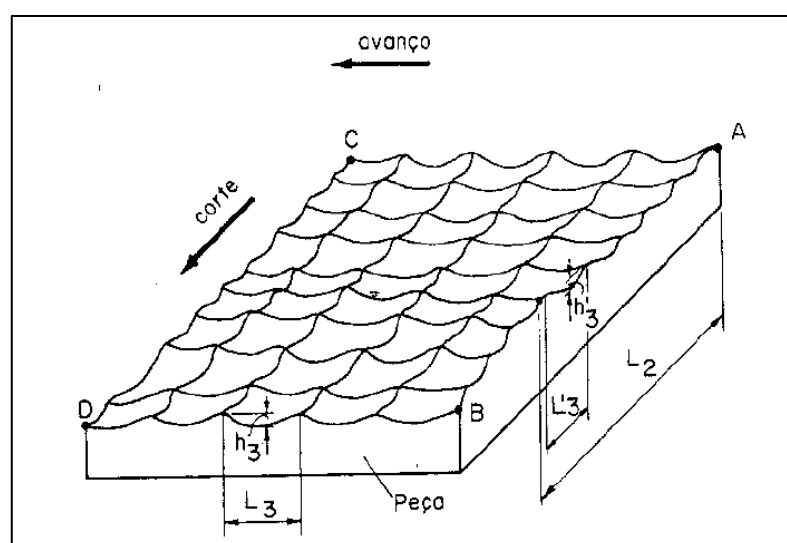
A rugosidade é fortemente influenciada pelos parâmetros de corte, destacando-se o avanço como o de impacto mais direto, uma vez que determina a espessura do cavaco e a

distância entre as marcas consecutivas deixadas pela ferramenta. Stemmer (2005) destaca que a rugosidade resultante de um processo de usinagem não depende exclusivamente da geometria da ferramenta ou dos parâmetros de corte. Em condições reais de fabricação, fatores como desgaste da aresta de corte, vibrações do sistema e fenômenos térmicos interferem diretamente na formação da superfície usinada, tornando a rugosidade um importante indicador da estabilidade do processo.

Segundo a norma ISO 3685 (1993), a definição adequada desses parâmetros deve equilibrar produtividade, qualidade dimensional e vida da ferramenta, pois combinações inadequadas podem levar à degradação do acabamento. Tal afirmação é corroborada por Groover (2020), que demonstra que o avanço apresenta relação quadraticamente proporcional com a rugosidade teórica, conforme a Equação 1.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da formação da rugosidade superficial em operações de usinagem. Observa-se que o movimento de avanço da ferramenta gera marcas sucessivas sobre a superfície da peça, cuja altura e espaçamento dependem diretamente da geometria da ferramenta e do avanço empregado. Dessa forma, avanços mais elevados tendem a produzir irregularidades mais pronunciadas, resultando em maiores valores de rugosidade, fato amplamente reportado na literatura e descrito pelas relações teóricas de formação da superfície usinada.

Figura 5 — Formação geométrica da rugosidade superficial em função do avanço da ferramenta



Fonte: Ferraresi (2018).

De acordo com a ABNT NBR ISO 4287 (2017), os parâmetros de rugosidade podem ser utilizados para quantificar diferentes características do perfil superficial. Dentre os parâmetros mais empregados na indústria, destacam-se o Ra (*Roughness Average*) e o Rz. O parâmetro Ra corresponde à média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil em relação à linha média de avaliação, sendo amplamente utilizado para caracterizar a qualidade geral do acabamento. Por representar um valor médio, o Ra fornece uma indicação global das irregularidades presentes na superfície, porém apresenta limitada sensibilidade a defeitos localizados, como picos ou vales isolados (ABNT NBR ISO 4287, 2017; Whitehouse, 2012).

Já o parâmetro Rz representa a altura máxima média do perfil de rugosidade, sendo determinado a partir da distância entre os picos mais elevados e os vales mais profundos dentro do comprimento de avaliação. Em comparação ao Ra, o Rz é mais sensível à presença de irregularidades severas e, por esse motivo, é frequentemente utilizado para identificar defeitos superficiais decorrentes de instabilidades do processo, desgaste da ferramenta ou vibrações durante a usinagem (ABNT NBR ISO 4287, 2017; Whitehouse, 2012).

A utilização conjunta desses parâmetros permite uma caracterização mais abrangente da superfície usinada. Enquanto o Ra fornece informações relacionadas ao comportamento médio das irregularidades superficiais, o Rz possibilita avaliar a ocorrência de picos e vales acentuados que podem comprometer o desempenho funcional do componente, influenciando propriedades como contato mecânico, desgaste, resistência à fadiga e capacidade de vedação (Groover, 2020; Whitehouse, 2012).

Nesse contexto, os parâmetros Ra e Rz foram selecionados neste trabalho por sua ampla aplicação industrial e por permitirem avaliar tanto a qualidade média do acabamento quanto a influência de fenômenos dinâmicos associados ao processo de torneamento interno.

A velocidade de corte, por sua vez, afeta diretamente a geração de calor na zona de usinagem e o desgaste da ferramenta, sendo um fator crítico para a vida útil da aresta. No entanto, ao analisar o torneamento de alumina, Gonçalves Júnior *et al.* (2015) observaram que, apesar de alterar as forças de usinagem, a profundidade de corte não influenciou significativamente a rugosidade da superfície, enquanto a velocidade e o avanço se mostraram parâmetros determinantes para a qualidade final. Estes resultados estão alinhados com os de Cheung e Lee (2018), que identificaram a formação de cavacos e o desgaste progressivo da ferramenta como fatores preponderantes na geração de irregularidades superficiais.

A rugosidade também se apresenta como um indicador sensível do comportamento dinâmico do processo de torneamento, sendo essencialmente controlada pelo avanço e pela capacidade do sistema de usinagem de amortecer as vibrações. Conforme demonstrado por Altintas (2012), vibrações do tipo "*chatter*" geram padrões ondulatórios característicos que elevam significativamente os valores de R_z. Desta forma, a avaliação do efeito do amortecimento de vibrações nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z constitui objetivo específico deste trabalho, visando comparar o desempenho de diferentes ferramentas para otimizar a qualidade das peças produzidas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e procedimentos adotados na realização dos experimentos.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A execução dos experimentos de torneamento interno foi realizada em um centro de usinagem multitarefa Mazak Integrex 300-III, ilustrado na Figura 6, equipado com sistema de placa-ponto para fixação da peça. Este equipamento oferece alta rigidez estrutural e controle de movimento preciso, necessários para a realização dos ensaios. Este equipamento possui capacidade máxima de torneamento de 1.524 mm de comprimento e diâmetro de até 635–760 mm, com rotação do *spindle* principal de até 4.000 RPM e potência de 22–30 kW, além de *spindle* de fresamento com rotação de até 12.000 RPM e potência de 15–20 kW.

Figura 6 — Mazak Integrex 300-III



Fonte: O autor (2026).

Para a medição da rugosidade superficial será utilizado um rugosímetro Mahr, modelo MarSurf GD 25 (Figura 7), com precisão de $\pm 5\%$ e range de medição de 0,01-100 μm Ra, seguindo os requisitos da norma ABNT NBR ISO 4288 (2017). O equipamento opera por

meio de um sistema de apalpador tátil com altas velocidades de medição de até 10 mm/s, eixos CNC com velocidade de posicionamento de até 50 mm/s no eixo Z e 200 mm/s no eixo X.

Figura 7 — Rugosímetro Mahr



Fonte: O autor (2025).

A seleção criteriosa desses equipamentos, com suas respectivas capacidades metrológicas e de controle, foi fundamental para garantir a confiabilidade dos dados coletados. Paralelamente, a definição do material a ser usinado representou outra etapa crucial para a padronização experimental, uma vez que suas propriedades mecânicas e características de usinabilidade influenciam diretamente os resultados do torneamento interno.

3.2 MATERIAL DO CORPO DE PROVA

O material usinado foi o aço SAE 1080 laminado, com diâmetro inicial de 87 mm e comprimento de 100 mm. Foram utilizadas 15 amostras, sendo 5 para cada condição de ferramenta testada. Este material foi selecionado por sua ampla aplicação na indústria metalmeccânica e características de usinabilidade conhecidas.

Além da identificação do material fornecida pelo fabricante, foi realizada uma análise química com o objetivo de confirmar a composição do aço utilizado nos ensaios (Anexo A). Esse procedimento é importante para garantir a conformidade do material com a especificação SAE 1080 e reduzir possíveis incertezas relacionadas à influência da composição química nos resultados obtidos durante a usinagem.

A análise permitiu verificar os principais elementos de liga presentes na amostra, destacando-se o teor de carbono como o principal responsável pelas propriedades mecânicas e

pelo comportamento do material durante o processo de corte. A confirmação da composição química assegura que as diferenças observadas nos resultados de rugosidade e ondulação estejam associadas predominantemente às condições experimentais e às características das ferramentas avaliadas, e não a variações significativas na matéria-prima utilizada.

Os resultados da análise química demonstraram compatibilidade com a faixa de composição especificada para o aço SAE 1080, indicando que o material utilizado apresenta características adequadas para a realização dos ensaios propostos. Dessa forma, foi possível estabelecer uma condição experimental mais controlada e representativa para a comparação entre as diferentes ferramentas de torneamento interno. Os resultados encontram-se na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1080 utilizado nos ensaios

Elemento	Teor (%)
C	0,770
Si	0,333
Mn	0,798
P	0,0096
S	0,0052
Cr	0,146
Mo	0,0216
Ni	0,0628
Fe	97,4

Fonte: O autor (2026).

Classificado como aço de alto teor de carbono dentro do sistema AISI/SAE, o SAE 1080 é composto predominantemente de ferro com teor de carbono entre 0,78% e 0,88%, além de pequenas quantidades de manganês, silício e fósforo, que contribuem para suas propriedades mecânicas e químicas.

Suas propriedades mecânicas incluem limite de escoamento de 585 MPa, resistência à tração de 965 MPa e módulo de elasticidade entre 190 GPa e 210 GPa, com densidade de 7,85 g/cm³. O elevado teor de carbono confere ao material uma combinação característica de alta resistência, dureza e resistência ao desgaste, além da capacidade de ser tratado termicamente para atingir diferentes níveis de dureza (Metal Zenith, 2025).

3.3 FERRAMENTAS

A primeira ferramenta utilizada, apresentada na Figura 8a, consiste em uma ferramenta convencional de torneamento interno, adotada como padrão de referência para os testes (*standard*). Sua seleção deve-se ao fato de representar uma configuração amplamente empregada em aplicações industriais, permitindo a comparação do seu desempenho com ferramentas projetadas para aumentar a rigidez estrutural ou minimizar os efeitos das vibrações durante a usinagem.

A segunda ferramenta (Figura 8b) foi projetada e fabricada pelo autor, com o corpo temperado por indução, concentrando-se no aumento da rigidez estrutural e na redução de vibrações.

Por fim, a ferramenta 3, *Silent Tools*™ (Figura 8c) foi incluída no estudo por se tratar de uma tecnologia avançada que utiliza sistemas de amortecimento internos para minimizar vibrações durante o corte, sendo reconhecida mundialmente por sua eficácia em estabilidade dinâmica.

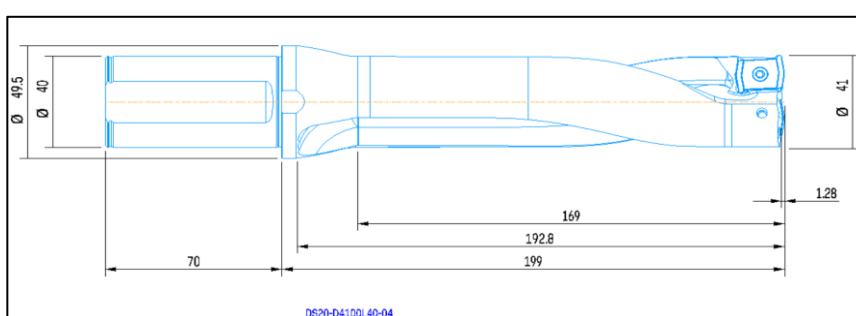
Figura 8 — Ferramentas utilizadas no experimento



Fonte: O autor (2026).

A Figura 9 apresenta a ferramenta utilizada para a furação inicial das amostras, composta por uma broca intercambiável, CoroDrill® DS20, modelo DS20-D4100L40-04, fabricada pela Sandvik Coromant. O seu corpo sólido é fabricado em aço, enquanto a ponta substituível é formada por insertos de metal duro, permitindo a troca durante o processo de usinagem. A ferramenta possui diâmetro de corte de 41 mm, haste cilíndrica com flat de 40 mm de diâmetro, comprimento total de 392 mm, comprimento de canal de 292 mm e profundidade máxima de furação de 288,3 mm, correspondendo a uma relação de 7xDC.

Figura 9 — Broca intercambiável



Fonte: Sandvik Coromant (2024).

O sistema conta com refrigeração interna passante (*through coolant*) e interface MDI (*Modular Drilling Interface*), que garante alta precisão de posicionamento e transmissão de torque por meio de quatro pinos de localização (Sandvik Coromant, 2024).

3.4 MÉTODO DO EXPERIMENTO

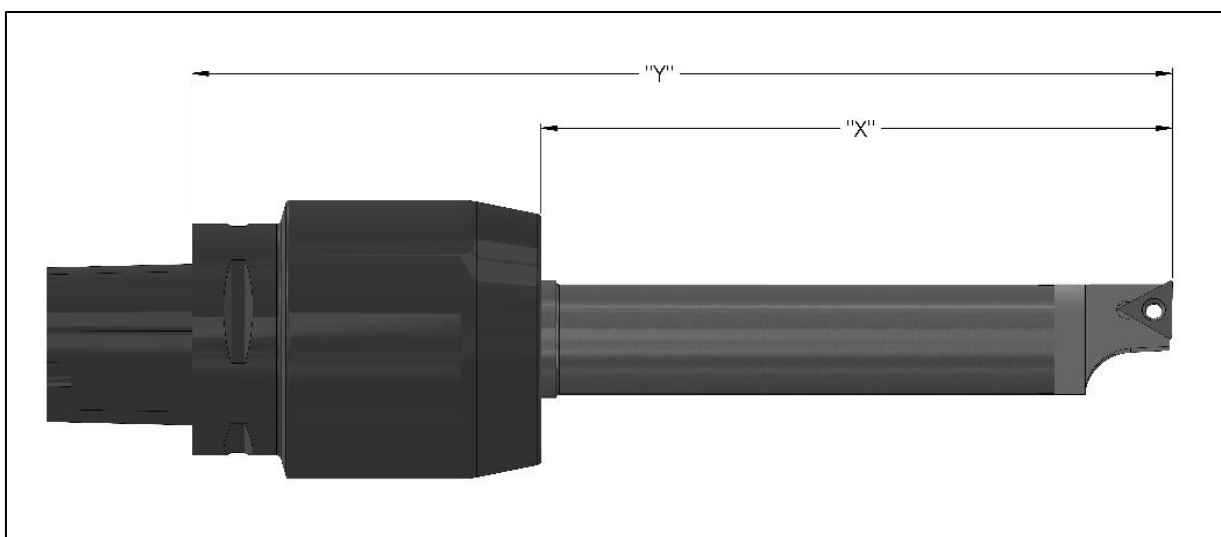
A avaliação será iniciada com a preparação das amostras onde previamente será realizada uma furação com uma broca de insertos intercambiáveis Sandvik Coromant, modelo DS20-D4100L40-04, com diâmetro de 41 mm (Figura 9), garantindo a preparação padronizada de todas as amostras. Após a furação, as peças serão encaminhadas para uma empresa terceira, onde será realizado o processo de normalização do material, com o objetivo de aliviar tensões internas geradas durante a furação, ou mesmo a laminação do aço em sua fabricação.

Com o retorno das amostras da normalização serão realizados os testes de qualidade superficial, iniciando com a Ferramenta 1 (*standard*), realizando a usinagem de cinco peças

com uma única passada, sob as seguintes condições de corte: velocidade de corte de 305 m/min, avanço de 0,12 mm/r e profundidade de corte (ap) de 1,0 mm, dados fornecidos pelo representante da pastilha. Posteriormente, a Ferramenta 1 será substituída pela Ferramenta 2 (temperada), com a usinagem de mais cinco amostras, mantendo-se os mesmos parâmetros de corte. Por fim, a Ferramenta 3 (*Silent Tools™*) será utilizada com o mesmo objetivo e sob as mesmas condições de usinagem.

As ferramentas 1 e 2 terão um balanço igual como pode ser visto na Figura 10, onde a medida X tem o valor de 164,7 milímetros e a medida Y de 255,7 milímetros.

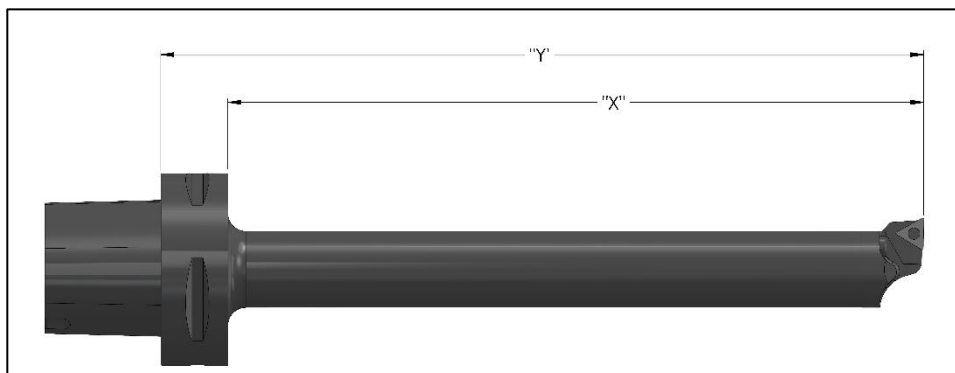
Figura 10 — Balanço ferramenta 1 e 2



Fonte: O autor (2025).

O inserto utilizado nas Ferramentas 1 e 2 foi o modelo Sandvik TCMX 16 T3 04-WF 5015. A geometria WF (*Wiper Finishing*) é projetada para operações de acabamento e semiacabamento, proporcionando melhor qualidade superficial por meio de uma aresta de corte otimizada, capaz de manter baixos valores de rugosidade mesmo em avanços mais elevados (Sandvik Coromant, 2024).

A ferramenta 3 por ter sua forma construtiva diferente terá um balanço distinto as outras 2, onde conforme Figura 13, terá sua medida de X de 228,3 milímetros e a medida Y de 250,10 milímetros. O inserto utilizado será da Sandvik TCMX 11 03 04-WF 5015.

Figura 11 — Balanço *Silent Tools*™

Fonte: O autor (2025).

Os insertos utilizados nas três condições experimentais foram selecionados para operações de torneamento interno de acabamento e semiacabamento, mantendo geometrias de corte e aplicações equivalentes. A principal diferença entre eles está no diâmetro do círculo inscrito (IC), parâmetro padronizado que define o tamanho do inserto. Nas Ferramentas 1 e 2 foi utilizado o inserto Sandvik TCMX 16 T3 04-WF 5015, com IC de 9,525 mm, enquanto na Ferramenta 3 foi empregado o inserto junto com o sistema *Silent Tools*™, com IC de 6,35 mm.

A utilização de insertos com dimensões distintas decorre das características construtivas e das limitações geométricas dos respectivos porta-ferramentas. Embora o tamanho do inserto possa influenciar aspectos como a resistência mecânica da aresta de corte, a rigidez local e a dissipação de calor, buscou-se manter equivalentes a aplicação, a geometria funcional e as condições de corte. Dessa forma, considera-se que as diferenças observadas nos resultados estão associadas predominantemente às características estruturais dos porta-ferramentas e à sua capacidade de amortecimento de vibrações, fatores que constituem o objeto principal de investigação deste trabalho.

Destaca-se ainda que a Ferramenta 3 incorpora um sistema interno de amortecimento passivo do tipo massa sintonizada (*Tuned Mass Damper*), tecnologia desenvolvida especificamente para reduzir vibrações em operações de torneamento interno com elevados comprimentos em balanço, permitindo maior estabilidade dinâmica e melhor qualidade superficial da peça usinada (Digernes, 2024; Munoa *et al.*, 2016).

A avaliação comparativa entre a ferramenta standard, a temperada por indução e a *Silent Tools*™ permitirá avaliar o comportamento dinâmico, o acabamento e a eficiência do

processo em diferentes configurações de ferramenta. Espera-se que os resultados contribuam para a otimização dos processos de usinagem, proporcionando melhorias na qualidade das peças produzidas por meio da seleção da ferramenta mais adequada.

3.4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras iniciou-se com o corte da matéria prima, conforme mencionado anteriormente uma barra de diâmetro de 87 mm de aço SAE 1080, onde foram cortadas 15 barras com comprimento de 105 mm. Após o corte as 15 amostras foram submetidas ao processo ilustrado na Figura 12, sendo colocadas no torno Mazak Integrex 300-III (Figura 6), onde foi realizado o faceamento para padronizar a espessura delas em 100 mm e também feito a furação utilizando a broca intercambiável DS20-D4100L40-04, (Figura 9).

Figura 12 — Faceamento e furação



Fonte: O autor (2026).

Ao concluir esta etapa, as 15 amostras foram encaminhadas para a empresa Nitron, onde foi realizado o tratamento térmico de normalização do aço SAE 1080, conforme certificado de qualidade apresentado no Anexo B. Após a normalização, as amostras seguiram para as etapas subsequentes de preparação e usinagem.

Conforme Fonseca (2024), a normalização é um tratamento térmico utilizado para promover o refino e a homogeneização da microestrutura dos aços. Dessa forma, mesmo que existam deformações decorrentes do processo de laminação da barra, a aplicação da normalização possibilita a obtenção de uma estrutura mais uniforme entre as amostras.

3.4.2 PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Foi realizada a montagem das três ferramentas e, após essa etapa, procedeu-se ao *preset* na máquina Zoller, ilustrado na Figura 13. O *preset* é um equipamento de medição utilizado para a determinação precisa das dimensões geométricas da ferramenta antes de sua montagem na máquina-ferramenta. O sistema utilizado permite medir parâmetros como comprimento, raio de ponta, posição da aresta de corte e diâmetro da ferramenta com elevada precisão, reduzindo erros de ajuste e o tempo de preparação do processo.

Durante os ensaios, o equipamento foi utilizado para realizar a medição e a compensação dimensional das ferramentas empregadas, garantindo maior repetibilidade entre as condições experimentais e minimizando possíveis desvios decorrentes do posicionamento da ferramenta. Além disso, o *preset* possibilita a transferência dos dados geométricos para o comando da máquina, contribuindo para a redução do tempo de *setup* e para o aumento da confiabilidade do processo de usinagem.

Figura 13 — Preset Zoller



Fonte: O autor (2026).

Com a medição das 3 ferramentas foram obtidas as respectivas medidas Y (Figuras 10 e 11) conforme a Tabela 2 a seguir.

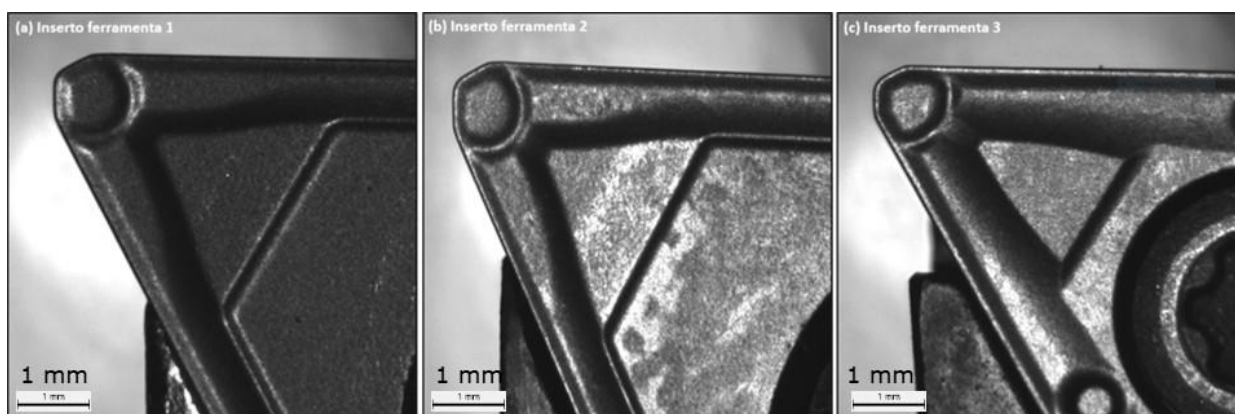
Tabela 2 – Preset ferramentas

Ferramenta	Modelo	Medida Y
Ferramenta 1	<i>Standard</i>	250,178 mm
Ferramenta 2	Temperada	249,997 mm
Ferramenta 3	<i>Silent Tools™</i>	250,053 mm

Fonte: O autor (2026).

Também foi realizada a fotografia do inserto antes da usinagem, com o objetivo de possibilitar a avaliação de um possível desgaste decorrente do processo de usinagem.

Figura 14 — Inserto das ferramentas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



3.4.3 USINAGEM DAS AMOSTRAS

Com as ferramentas devidamente medidas, estas foram instaladas no torno Mazak Integrex 300-III (Figura 6), dando início aos testes de usinagem. A amostra foi fixada por meio de castanhas duras, que prendiam 56 mm de comprimento, enquanto a face traseira da peça era apoiada diretamente na placa, garantindo uma fixação adequada (Figura 15).

Em seguida, iniciou-se o processo experimental, de acordo com a sequência ilustrada na Tabela 3 a seguir. Os processos de usinagem de cada ferramenta encontram-se ilustrados na Figura 16.

Figura 15 — Fixação amostra



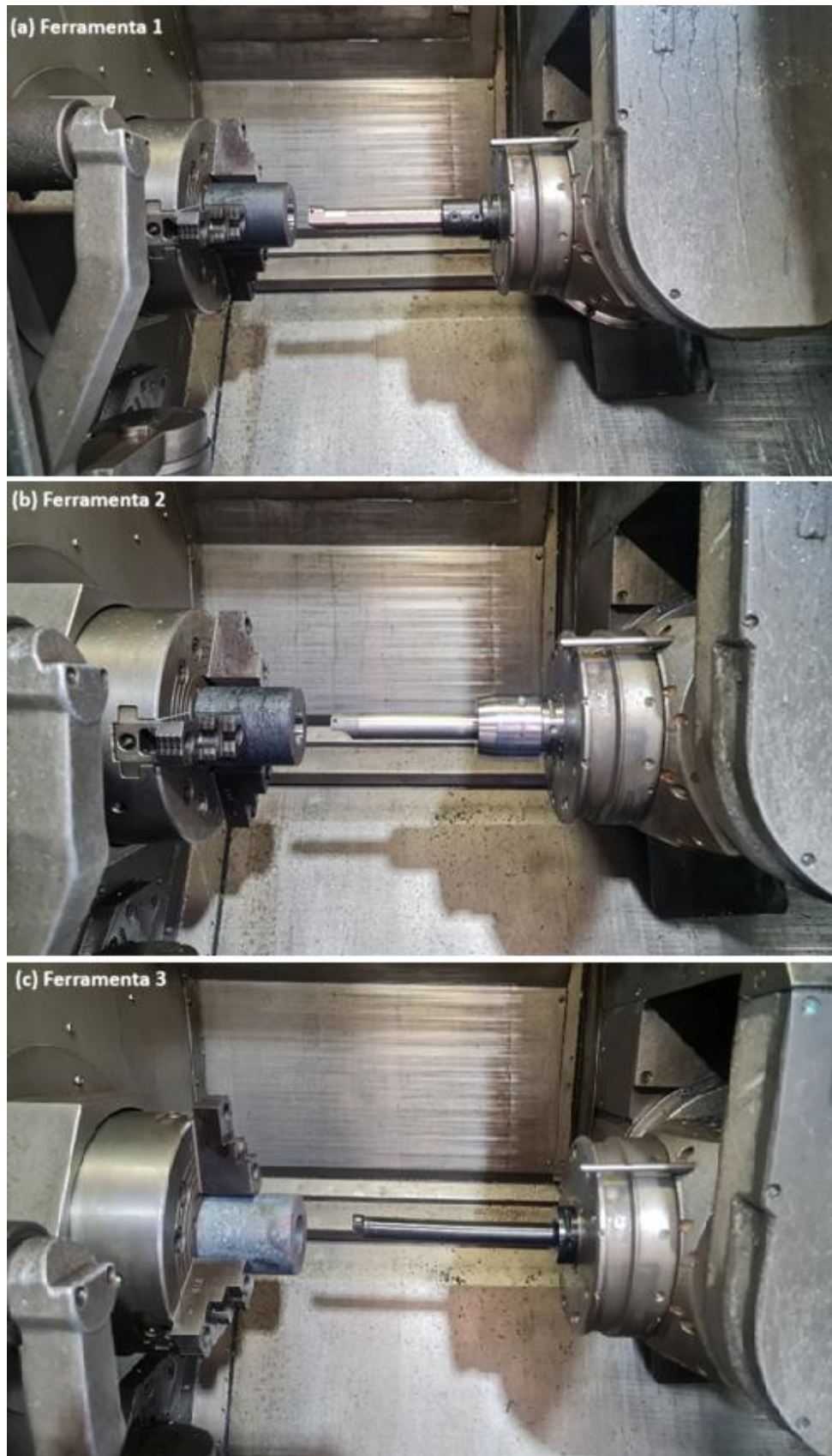
Fonte: O autor (2026).

Tabela 3 – Sequência dos ensaios experimentais realizados

Ordem	Ferramenta	Número de amostras	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/r)	Profundidade de corte ap (mm)
1	Ferramenta 1 (<i>standard</i>)	5	305	0,12	1,0
2	Ferramenta 2 (Corpo temperado por indução)	5	305	0,12	1,0
3	Ferramenta 3 (<i>Silent Tools™</i>)	5	305	0,12	1,0

Fonte: O autor (2026).

Figura 16 — Processo de usinagem das ferramentas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



Fonte: O autor (2026).

3.5 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E TEXTURA

Nos ensaios realizados, a qualidade superficial das amostras foi avaliada por meio da medição dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz, utilizando um rugosímetro Mahr, modelo MarSurf GD25 (Figura 7). Cada amostra foi medida três vezes na região inicial da usinagem (largura de avaliação de 25 mm), sendo considerada a média dos valores obtidos como a rugosidade média associada a cada ferramenta, o que reduz significativamente o efeito de ruídos de medição e aumenta a confiabilidade dos resultados.

Para a medição foi utilizado os seguintes dados: *cut-off* de 2,5 mm; Comprimento de avaliação 25 mm e velocidade 0,5 mm/s. O *cut-off* foi definido de acordo com a norma (ISO 4288), adequado à faixa de rugosidade observada no estudo, garantindo a correta separação entre rugosidade e ondulação.

A amostra que apresentar o melhor acabamento (menores valores de Ra e Rz) terá sua textura superficial analisada por meio de imagens, possibilitando correlacionar os dados quantitativos com o aspecto visual da superfície.

Esse procedimento estabelece uma metodologia objetiva para comparação do desempenho das ferramentas, relacionando diretamente as condições de usinagem às características finais da peça. Os dados obtidos servirão de base para a análise da influência da construção e do amortecimento das ferramentas no torneamento interno.

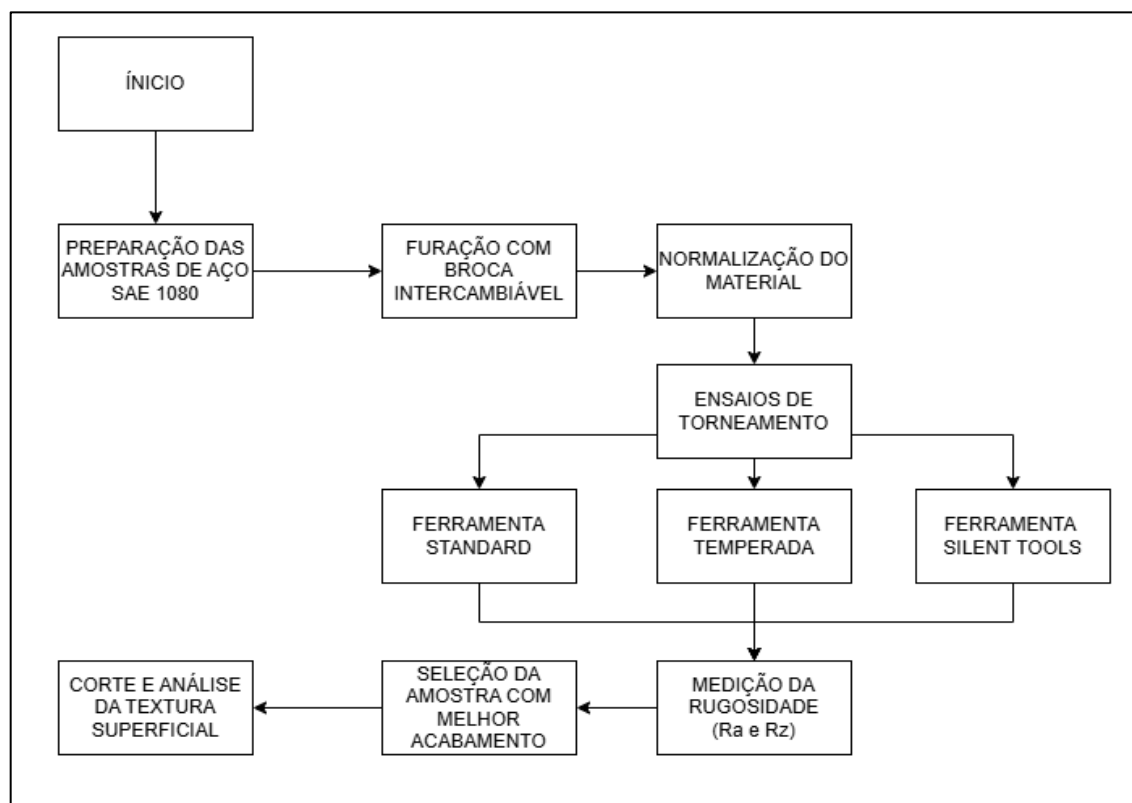
Ainda, antes do início das medições foi realizada uma calibração utilizando padrão de rugosidade calibrado pela Certi, assim garantido a certeza dos dados obtidos conforme o certificado em Anexo C.

Adicionalmente, foram avaliados os parâmetros Wa e Wz, relacionados à ondulação superficial, permitindo uma análise mais completa das irregularidades presentes na superfície usinada, especialmente aquelas associadas a vibrações de baixa frequência.

3.6 FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DA PROPOSTA

O fluxograma exposto na Figura 17 a seguir mostra o planejamento para execução da proposta do trabalho. O processo se inicia com a preparação das amostras de aço SAE 1080, seguida pela furação com broca intercambiável para a criação do furo base. Na sequência, as peças são encaminhadas para normalização, visando o alívio das tensões residuais geradas nas etapas anteriores.

Figura 17 — Fluxograma da proposta



Fonte: O autor (2025).

Com as amostras normalizadas, iniciam-se os ensaios de torneamento interno, conduzidos em paralelo com três configurações distintas de ferramenta: standard, temperada por indução e *Silent Tools*TM, cada uma usinando cinco amostras sob os mesmos parâmetros de corte. Após a usinagem, realiza-se a medição da rugosidade superficial (Ra e Rz) de todas as peças, permitindo a seleção da amostra com melhor acabamento de cada grupo. Por fim, a amostra selecionada é submetida ao corte e análise da textura superficial, etapa que fornecerá os dados comparativos finais entre as três ferramentas avaliadas.

4 RESULTADOS

O capítulo atual tem como finalidade, apresentar os resultados dos ensaios de torneamento interno e verificar a efetividade das diversas condições da ferramenta na qualidade superficial resultante.

4.1 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Após a conclusão da usinagem, as amostras foram encaminhadas ao laboratório para a realização das medições de rugosidade superficial. Os resultados completos das medições realizadas para as três ferramentas são apresentados nos Anexos G, H e I. Já os relatórios completos emitidos pelo equipamento de medição, contendo os gráficos e demais informações detalhadas, encontram-se nos Anexos D, E e F.

A Figura 18 apresenta a comparação dos valores médios de rugosidade Ra obtidos nas cinco amostras usinadas para as três ferramentas avaliadas: ferramenta padrão, ferramenta temperada e ferramenta *Silent Tools*™. Os dados encontram-se sumarizados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Resumo dos valores médios das medições das três ferramentas

	Ra	Rz	Rsk	Wa	Wz
Ferramenta 1	7,224	35,750	0,381	2,721	10,294
Ferramenta 2	2,302	11,864	0,413	1,330	3,575
Ferramenta 3	3,056	16,836	0,250	1,894	4,748

Fonte: O autor (2026).

Foi ainda calculado as médias desvio padrão para as três ferramentas, conforme exposto nas Tabelas 5, 6 e 7 a seguir.

Tabela 5 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 1

Amostra	Ra (μm)	σ Ra	Rz (μm)	σ Rz	Wa (μm)	σ Wa	Wz (μm)	σ Wz
1	4,928	0,155	23,602	0,585	2,666	0,244	10,907	1,511
2	5,366	0,004	29,268	0,052	3,060	0,006	12,477	0,034
3	11,134	0,012	53,215	0,095	1,580	0,012	7,073	0,007
4	7,376	0,003	38,023	0,025	3,189	0,006	12,166	0,017
5	7,313	0,003	34,641	0,090	3,112	0,026	8,845	0,056

Fonte: O autor (2026).

Tabela 6 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 2

Amostra	Ra (μm)	σ Ra	Rz (μm)	σ Rz	Wa (μm)	σ Wa	Wz (μm)	σ Wz
1	2,193	0,001	11,470	0,020	0,675	0,001	3,121	0,020
2	2,303	0,000	10,645	0,020	1,503	0,014	3,600	0,038
3	2,236	0,002	12,883	0,065	2,121	0,016	4,418	0,029
4	2,455	0,002	11,280	0,034	0,964	0,023	2,544	0,019
5	2,322	0,011	13,044	0,029	1,387	0,012	4,192	0,048

Fonte: O autor (2026).

Tabela 7 – Média e desvio padrão das medições de rugosidade e ondulação da Ferramenta 3

Amostra	Ra (μm)	σ Ra	Rz (μm)	σ Rz	Wa (μm)	σ Wa	Wz (μm)	σ Wz
1	1,468	0,004	9,501	0,004	1,458	0,023	3,570	0,027
2	2,578	0,002	13,172	0,019	1,589	0,013	4,118	0,017
3	1,866	0,001	12,353	0,016	1,386	0,004	3,192	0,020
4	9,250	0,001	46,547	0,145	3,286	0,035	10,349	0,058
5	1,893	0,001	12,433	0,020	4,314	0,066	6,902	0,036

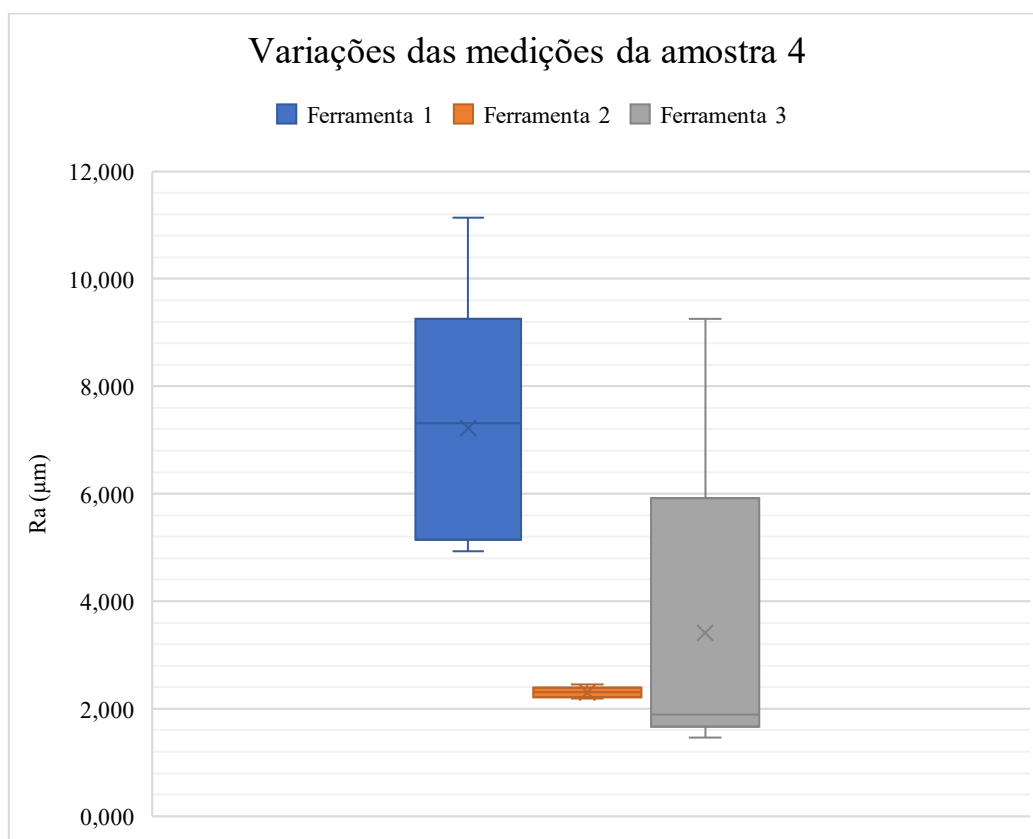
Fonte: O autor (2026).

As três medições realizadas em cada amostra apresentaram baixos desvios-padrão para todos os parâmetros avaliados, evidenciando elevada repetibilidade do procedimento de medição e boa confiabilidade metrológica dos resultados obtidos. Dessa forma, as diferenças

observadas entre as amostras e entre as ferramentas podem ser atribuídas predominantemente ao comportamento do processo de usinagem, e não a variações do método de medição.

Durante o ensaio com a Ferramenta 3, a amostra 4 apresentou um valor de rugosidade R_a nitidamente discrepante. Ao analisar visualmente a amostra, constatou-se que esse pico decorreu de um lascamento (*chipping*) isolado na aresta de corte do inserto. Como hipótese para a ocorrência desta falha, aponta-se a ação combinada de choque térmico e/ou impacto mecânico e, por conta do desgaste mais severo do inserto em relação aos outros, possíveis problemas relacionados a homogeneidade do material, inclusões que possam ter afetado o inserto. O comportamento deste ponto é apresentado na Figura 18.

Figura 18 — Variações das medições da amostra 4 por ferramenta (*Box plot*)

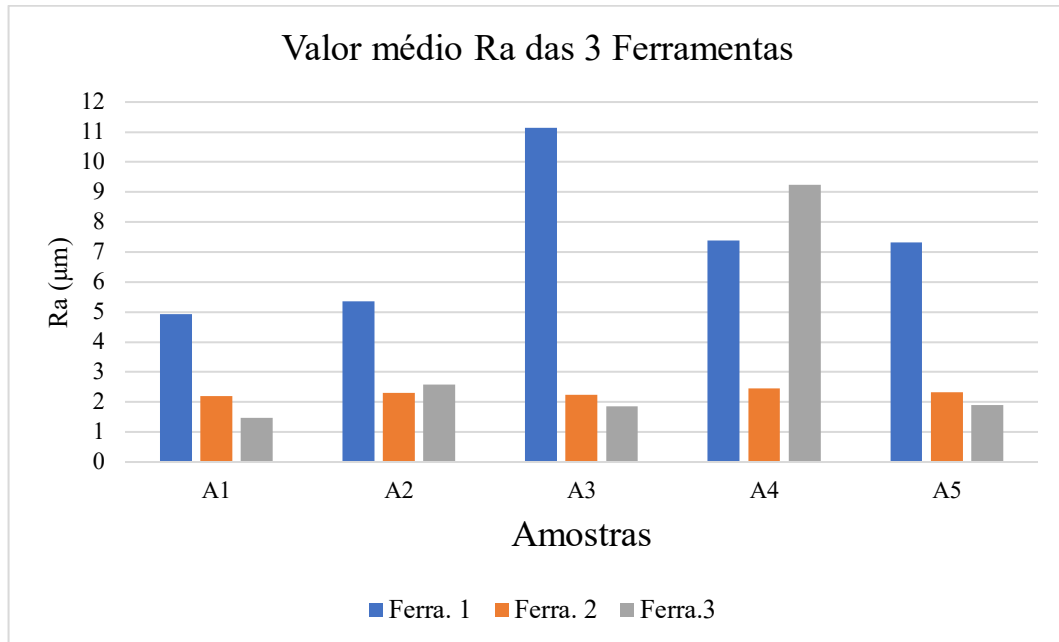


Fonte: O autor (2026).

Como a perda da geometria original do inserto invalida a análise do comportamento dinâmico real do sistema antivibratório, a amostra foi desconsiderada das análises estatísticas

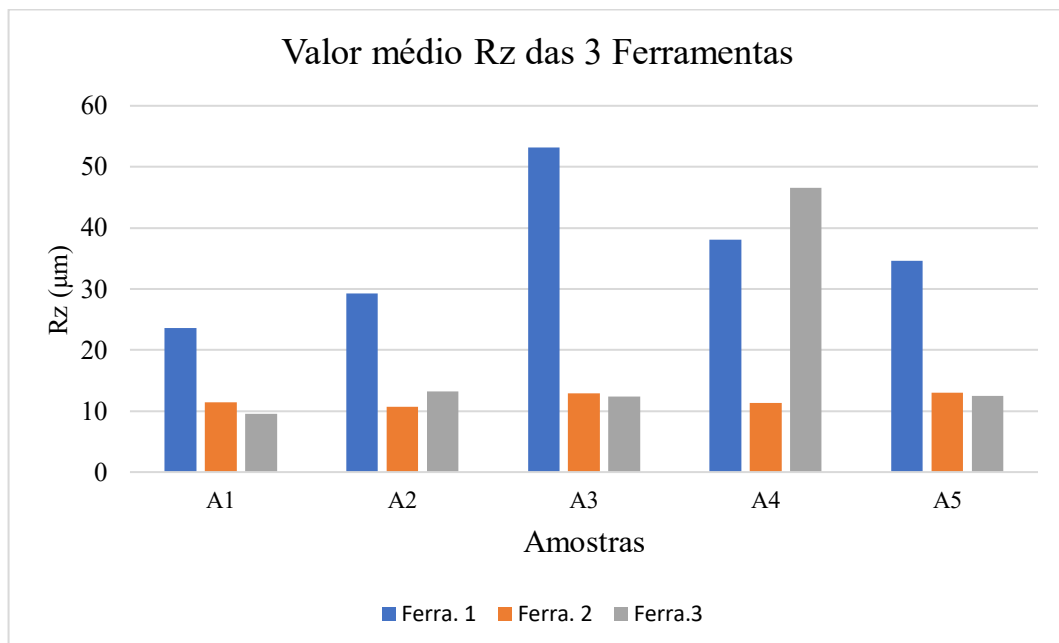
seguintes para não distorcer os resultados. Na sequência foram analisados os valores médios dos parâmetros Ra e Rz (Figuras 19 e 20).

Figura 19 — Valores médios do parâmetro Ra por ferramenta



Fonte: O autor (2026).

Figura 20 — Valores médios do parâmetro Rz por ferramenta



Fonte: O autor (2026).

A análise dos resultados médios indicou que a Ferramenta 1 apresentou os maiores valores de rugosidade, com Ra médio de aproximadamente 7,22 μm e Rz de 35,75 μm . Esses resultados evidenciam um acabamento inferior, com presença significativa de irregularidades tanto em micro quanto em macroescala. Segundo Whitehouse (2011), a rugosidade está associada às marcas de reprodução geométrica da ferramenta.

Em contraste, a Ferramenta 2 apresentou resultados superiores, com valores médios de Ra de 2,30 μm e Rz de 11,86 μm , indicando não apenas um melhor acabamento, mas também uma elevada estabilidade do processo, uma vez que a rugosidade manteve níveis baixos de variação, reduzindo o impacto das vibrações durante o processo.

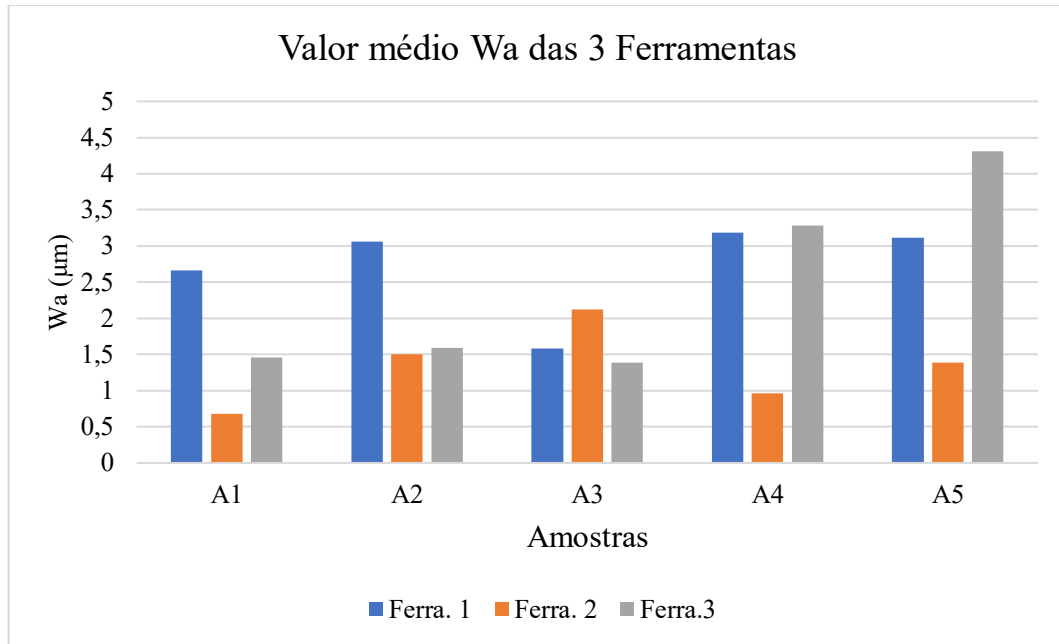
A Ferramenta 3, após a exclusão da amostra anômala, apresentou o menor valor médio de rugosidade Ra, aproximadamente 1,95 μm , e valores de Rz praticamente iguais aos da Ferramenta 2, próximos de 11,86 μm , indicando que a ferramenta foi eficaz na redução da rugosidade de pequena escala.

Além dos valores numéricos apresentados na Tabela 4, os perfis de rugosidade e ondulação obtidos pelo rugosímetro, disponíveis nos Anexos D, E e F, permitiram uma avaliação qualitativa do comportamento superficial gerado por cada ferramenta. Na Ferramenta 1, observou-se maior variabilidade entre as amostras, com perfis caracterizados por oscilações de elevada amplitude e pela presença de regiões com picos e vales pronunciados, especialmente nas Amostras 3 e 4.

Por outro lado, a Ferramenta 2 apresentou perfis mais uniformes ao longo de todo o comprimento de medição, com distribuição regular das irregularidades superficiais e reduzida variação da componente de ondulação entre as amostras. Já a Ferramenta 3 produziu perfis de baixa amplitude nas Amostras 1, 2, 3 e 5, evidenciando a eficiência do sistema *Silent Tools*TM na atenuação das vibrações associadas à formação da rugosidade. A única exceção foi a Amostra 4, cujo perfil apresentou oscilações de amplitude muito superior às demais, corroborando a hipótese de lascamento da aresta de corte e justificando sua exclusão das análises estatísticas.

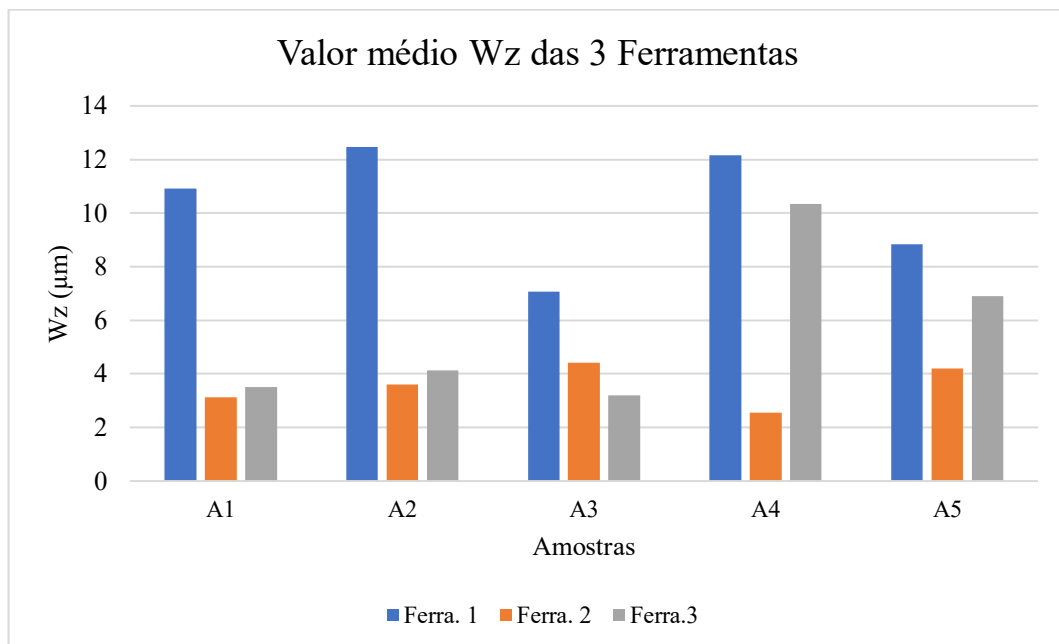
Na sequência foram analisados os valores médios dos parâmetros Wa e Wz (Figuras 21 e 22).

Figura 21 — Valores médios do parâmetro Wa por ferramenta



Fonte: O autor (2026).

Figura 22 — Valores médios do parâmetro Wz por ferramenta



Fonte: O autor (2026).

A análise dos resultados médios indicou que a Ferramenta 1 apresentou valores elevados de Wa e Wz, respectivamente 2,72 µm e 10,29 µm. De acordo com Whitehouse (2011), a ondulação superficial (Wa e Wz) é gerada por desvios de média frequência causados

por deflexões e componentes dinâmicas da máquina-ferramenta. Assim, os elevados valores de ondulação encontrados caracterizam a ocorrência de vibrações severas durante o processo de usinagem, visto que o surgimento dessas marcas texturais na superfície está diretamente indexado a instabilidades dinâmicas do sistema (*chatter*), como discutido por Trent e Wright (2000) e Santos (2015).

Por outro lado, a Ferramenta 2 apresentou baixos níveis de ondulação, com W_a de $1,33 \mu\text{m}$ e W_z de $3,58 \mu\text{m}$, indicando uma elevada estabilidade do processo, uma vez que tanto a rugosidade quanto a ondulação se mantiveram em níveis baixos, resultando em um processo mais controlado e repetível.

A Ferramenta 3 apresentou valores de W_a e W_z superiores aos da Ferramenta 2, atingindo aproximadamente $2,19 \mu\text{m}$ e $4,45 \mu\text{m}$, respectivamente. Esse resultado indica que, embora a ferramenta tenha sido eficaz na redução da rugosidade de pequena escala, ainda existem ondulações associadas ao processo. Essa diferença entre rugosidade e ondulação sugere que o sistema de amortecimento interno atua de maneira mais eficiente na supressão de vibrações de alta frequência, mas apresenta limitações no controle de movimentos estruturais mais amplos.

A ondulação não é gerada diretamente pela ação geométrica da ferramenta de corte, mas sim pelo comportamento dinâmico do sistema de usinagem. Conforme explicam Machado *et al.* (2017) e Santos (2015), esses desvios macrogeométricos podem ser originados por instabilidades dinâmicas, vibrações autoexcitadas (*chatter*) ou flexões do conjunto peça-ferramenta durante o processo.

Assim, valores elevados de W_a e W_z indicam instabilidade severa na operação, mesmo quando os parâmetros de rugosidade se mantêm em patamares aceitáveis. Além disso, a ondulação apresenta um caráter mais periódico e estruturado do que a rugosidade. Sob a perspectiva da metrologia e da engenharia de superfícies, Whitehouse (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2014) apontam que essas macromarcas texturais exercem impacto direto em fenômenos funcionais da peça em serviço, comprometendo o contato mecânico entre superfícies acopladas e influenciando diretamente os mecanismos de desgaste e a geração de ruído.

Conforme definido na norma ISO 4287, o W_a representa o valor médio das amplitudes da ondulação, enquanto W_z indica a diferença entre os picos e vales máximos dessa componente do perfil. Dessa forma, esses parâmetros permitem avaliar não apenas a qualidade local do acabamento, mas também a integridade geométrica global da superfície.

Ondulação não é gerada diretamente pela ação da ferramenta de corte, mas sim pelo comportamento dinâmico do sistema de usinagem, podendo ser causada por vibrações autoexcitadas (*chatter*), desalinhamentos, variações térmicas ou flexões da peça e da ferramenta durante o processo. Assim, valores elevados de W_a e W_z indicam instabilidade no processo, mesmo quando os valores de rugosidade são considerados aceitáveis. Além disso, a ondulação apresenta caráter mais periódico e estruturado do que a rugosidade, podendo ter impacto direto em fenômenos funcionais como desgaste, ruído e contato mecânico entre superfícies.

Essa independência entre os desvios microgeométricos e macrogeométricos é amplamente respaldada na literatura de fabricação mecânica. Conforme apontado por Diniz, Marcondes e Coppini (2014), uma peça usinada pode apresentar um excelente acabamento visual e baixos valores de rugosidade aritmética (R_a), sendo falsamente considerada "aprovada" em uma inspeção visual rápida. No entanto, se o sistema sofrer com vibrações sutis induzidas por desbalanceamento ou falta de rigidez da máquina (gerando alta ondulação), essa mesma peça falhará gravemente em operação. O impacto prático disso inclui a perda de sustentação do filme lubrificante, vazamentos em sistemas de vedação e a geração de ruído excessivo em componentes dinâmicos, como eixos e rolamentos (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

Do ponto de vista funcional, os parâmetros de ondulação são críticos em componentes sujeitos a contato dinâmico, como eixos, mancais e engrenagens. Superfícies com baixa rugosidade, mas alta ondulação, podem apresentar desempenho insatisfatório devido à presença de irregularidades de maior escala que afetam a distribuição de carga, aumentam o atrito e reduzem a vida útil do componente.

Nas medições realizadas, a Ferramenta 1 apresentou os maiores valores de W_a e W_z , evidenciando a presença de ondulações na superfície usinada. Esse comportamento está diretamente associado à baixa estabilidade dinâmica do sistema, indicando que as vibrações durante o processo não foram adequadamente controladas. Por outro lado, a Ferramenta 2 apresentou os menores valores desses parâmetros, demonstrando que o processo ocorreu de forma estável, com baixa influência de vibrações. Esse resultado confirma que a melhoria da rigidez estrutural contribui significativamente para a redução da ondulação e para o aumento da qualidade global da superfície.

Já a Ferramenta 3 apresentou valores intermediários de W_a e W_z , superiores aos da Ferramenta 2, porém inferiores aos da Ferramenta 1. Esse comportamento indica que, embora

o sistema de amortecimento tenha sido eficaz na redução da rugosidade (R_a), ele não eliminou completamente a presença de ondulações. Dessa forma, a Ferramenta 3 demonstra um desempenho diferenciado, sendo capaz de produzir superfícies com excelente acabamento fino, mas ainda com influência moderada de vibrações de baixa frequência, evidenciando a complexidade do controle dinâmico em operações de torneamento interno.

A Ferramenta 1 apresentou elevada variabilidade nos resultados, evidenciada tanto pela dispersão dos valores de rugosidade quanto pelos parâmetros de ondulação. Esse comportamento é característico de processos instáveis, nos quais a interação entre ferramenta e peça sofre variações ao longo da usinagem. Já a Ferramenta 2 apresentou baixa variabilidade, indicando um processo consistente e confiável. A Ferramenta 3 apresentou uma variabilidade intermediária, reforçando a ideia de que sistemas com amortecimento dinâmico, embora eficientes, podem apresentar sensibilidade a variações nas condições operacionais.

Essa diferença de comportamento também pode ser observada visualmente nos perfis registrados pelo rugosímetro. Enquanto a Ferramenta 1 apresentou maior dispersão dos picos e amplitudes significativamente distintas entre as amostras, a Ferramenta 2 manteve perfis bastante semelhantes durante todo o experimento. A Ferramenta 3 apresentou comportamento intermediário, caracterizado por perfis geralmente uniformes, porém com sensibilidade à ocorrência de eventos localizados, como o observado na Amostra 4. Assim, a análise dos gráficos complementa a interpretação estatística dos resultados, evidenciando que a melhoria da qualidade superficial está associada não apenas à redução dos valores médios de rugosidade e ondulação, mas também ao aumento da repetibilidade e da estabilidade do processo de usinagem.

Na literatura de usinagem, essa discrepância de comportamento encontra amparo direto nos mecanismos de desgaste e na dinâmica de corte. Conforme apontado por Trent e Wright (2000) e Machado *et al.* (2017), o desgaste irregular da ferramenta e o lascamento microestrutural alteram continuamente a geometria da aresta ao longo do ensaio. Esse fenômeno modifica as forças de corte envolvidas, justificando a alta dispersão e a instabilidade geométrica registradas na Ferramenta 1.

Por outro lado, o comportamento das Ferramentas 2 e 3 está intrinsecamente ligado à rigidez do sistema. No caso de ferramentas longas ou esbeltas, a literatura destaca que sistemas equipados com amortecimento dinâmico — como os mecanismos de absorção abordados por Altintas (2012) e Santos (2015) — são altamente eficazes no controle de vibrações autoexcitadas (*chatter*). Contudo, como discutido nos estudos de Lara (2017), esses

dispositivos operam em faixas ótimas de estabilidade bem delineadas. Pequenas flutuações nas condições de contorno do processo, tais como micro-heterogeneidades na dureza do material da peça ou variações na taxa de amortecimento fluido, podem fazer o sistema oscilar ligeiramente em zonas de transição. Isso explica perfeitamente a variabilidade intermediária e a sensibilidade operacional manifestadas pela Ferramenta 3.

4.2 ANÁLISE VISUAL DA TEXTURA

Para complementar a análise quantitativa dos parâmetros de textura superficial, realizou-se uma avaliação visual qualitativa das superfícies usinadas. Para cada ferramenta, selecionaram-se a melhor e a pior amostra com base nos resultados obtidos. A classificação foi estabelecida considerando conjuntamente os parâmetros de rugosidade (R_a e R_z) e ondulação (W_a e W_z), uma vez que a qualidade superficial não depende apenas das irregularidades de pequena escala, mas também dos desvios periódicos associados ao comportamento dinâmico do processo de usinagem. Dessa forma, foram consideradas como melhores condições as amostras que apresentaram simultaneamente baixos valores de rugosidade e ondulação, enquanto as piores condições corresponderam às amostras que apresentaram os maiores valores desses parâmetros ou evidências de instabilidade durante o corte.

No caso da Ferramenta 1, a Amostra 1 foi selecionada como a condição de melhor desempenho (Figura 23a), por apresentar os menores valores de rugosidade e uma das menores amplitudes de ondulação entre as amostras avaliadas. Visualmente, observa-se uma superfície com marcas de avanço mais uniformes e menor variação do perfil ao longo da região usinada. Por outro lado, a Amostra 3 foi classificada como a condição de pior desempenho (Figura 23b), devido aos elevados valores de R_a e R_z e à presença de marcas superficiais mais pronunciadas, compatíveis com as oscilações identificadas nos perfis medidos pelo rugosímetro.

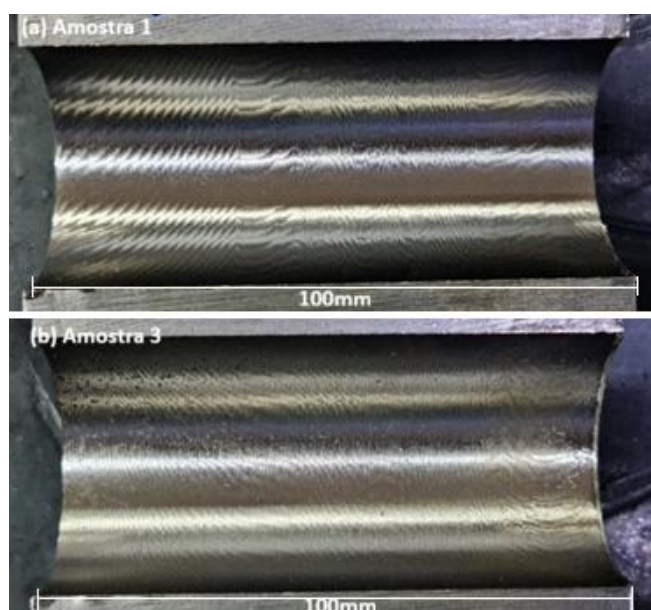
Para a Ferramenta 2, a Amostra 1 foi considerada a melhor condição (Figura 24a), apresentando simultaneamente os menores valores de ondulação ($W_a = 0,675 \mu\text{m}$ e $W_z = 3,121 \mu\text{m}$) e baixos índices de rugosidade, indicando elevada estabilidade do processo. A Amostra 5 foi selecionada como a condição menos favorável (Figura 24b), por apresentar os maiores valores de R_z e W_z entre as amostras dessa ferramenta, embora ainda permanecendo em níveis significativamente inferiores aos observados para a Ferramenta 1. As imagens

corroboram os resultados quantitativos, evidenciando uma superfície mais homogênea quando comparada à ferramenta convencional.

Para a Ferramenta 3, a Amostra 1 foi classificada como a melhor condição (Figura 25a), apresentando os menores valores de R_a , R_z , W_a e W_z da ferramenta, além de uma aparência visual uniforme e livre de irregularidades perceptíveis. Inicialmente, a Amostra 4 seria classificada como a pior condição em função dos elevados valores de rugosidade e ondulação; entretanto, conforme discutido anteriormente, essa condição foi influenciada por um lascamento da aresta de corte e não representa o comportamento real do sistema antivibratório. Dessa forma, para fins comparativos, a Amostra 2 foi adotada como a condição menos favorável entre as amostras válidas da Ferramenta 3 (Figura 25b), por apresentar os maiores valores combinados de R_a , R_z e W_z entre as condições não afetadas pela falha do inserto.

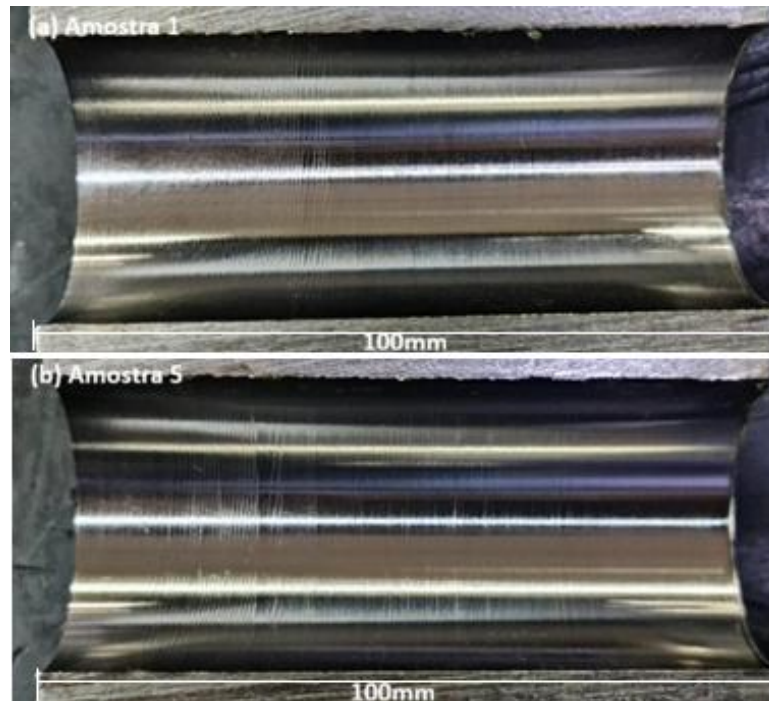
A comparação entre as imagens e os parâmetros medidos demonstra que a aparência visual da superfície acompanha de maneira consistente os resultados de rugosidade e ondulação. Contudo, observa-se que diferenças relativamente pequenas nos valores de W_a e W_z nem sempre são facilmente perceptíveis visualmente, reforçando a importância da avaliação metrológica para a caracterização completa da qualidade superficial obtida durante o torneamento interno.

Figura 23 — Análise de textura da Ferramenta 1



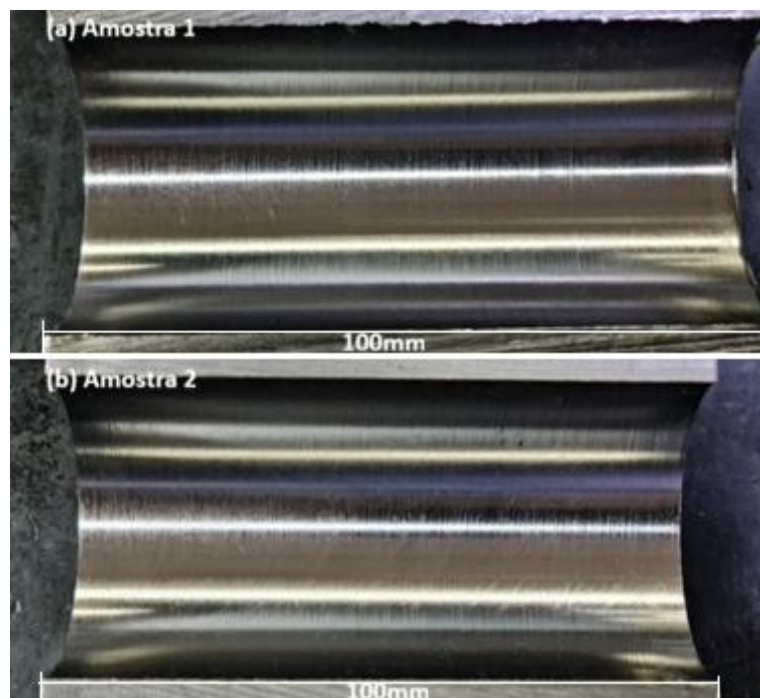
Fonte: O autor (2026).

Figura 24 — Análise de textura da Ferramenta 2



Fonte: O autor (2026).

Figura 25 — Análise de textura da Ferramenta 3



Fonte: O autor (2026).

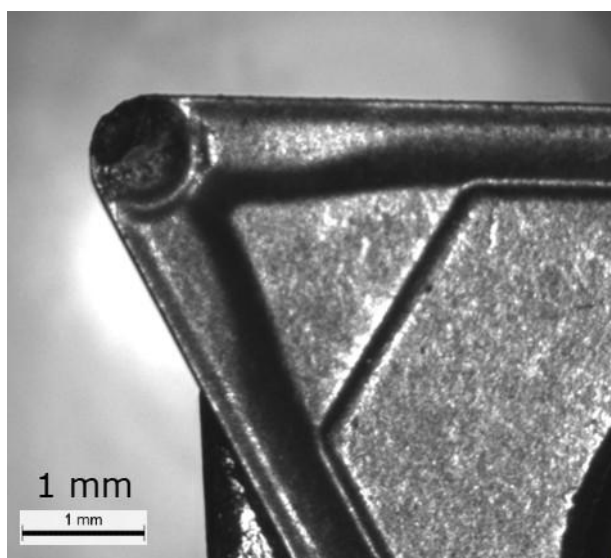
A análise visual das superfícies permitiu confirmar a tendência observada nos dados de rugosidade, evidenciando que as amostras com menores valores de R_a e R_z apresentaram superfícies mais homogêneas, com menores irregularidades visíveis como pode ser visto na Figura 25. Em contraste, as amostras com maiores valores de rugosidade apresentaram marcas mais pronunciadas, com presença de sulcos e irregularidades associadas a instabilidades durante o processo de usinagem como demonstra a Figura 23.

Essa correlação entre análise quantitativa e qualitativa reforça a confiabilidade dos resultados obtidos, demonstrando que os parâmetros de rugosidade utilizados são representativos do comportamento real da superfície usinada.

Além da análise óptica dos desgastes, foi realizada uma avaliação visual dos insertos após a usinagem, com o objetivo de identificar quais os tipos de mecanismos de desgaste e sua influência no acabamento obtido. As imagens a seguir apresentam o estado das arestas de corte das ferramentas após os ensaios, permitindo correlacionar o desgaste observado com os resultados de rugosidade e estabilidade do processo.

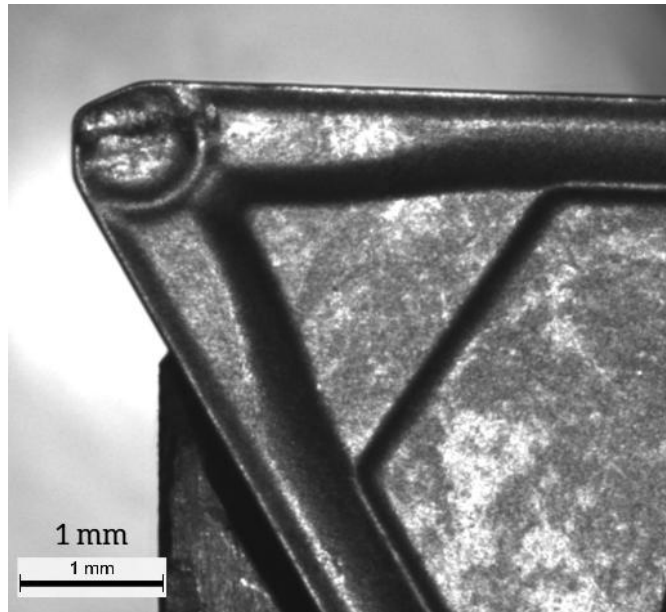
A macrofotografia dos insertos desgastados (Figuras 26, 27 e 28) indica a atuação de distintos mecanismos de desgaste, os quais exercem influência direta sobre a qualidade superficial obtida. Nas condições da ferramenta *standard* (Figura 26) e ferramenta temperada (Figura 27), a macrofotografia revela a manutenção da integridade geométrica primária do raio de ponta do inserto, embora com faixas de atrito lateral visíveis.

Figura 26 — Vista do inserto 1 após usinagem



Fonte: O autor (2026).

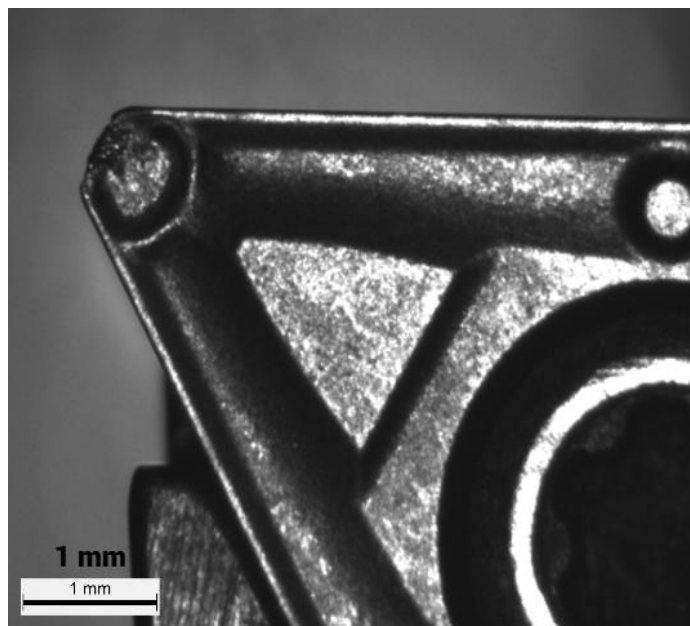
Figura 27 — Vista do inserto 2 após usinagem



Fonte: O autor (2026).

Em contrapartida, o ensaio associado à condição ferramenta *Silent Tools*TM exibiu um comportamento nitidamente severo e distinto. Conforme exposto na Figura 28, observa-se uma perda de regularidade geométrica localizada exatamente no raio de ponta do inserto.

Figura 28 — Vista do inserto 3 após usinagem

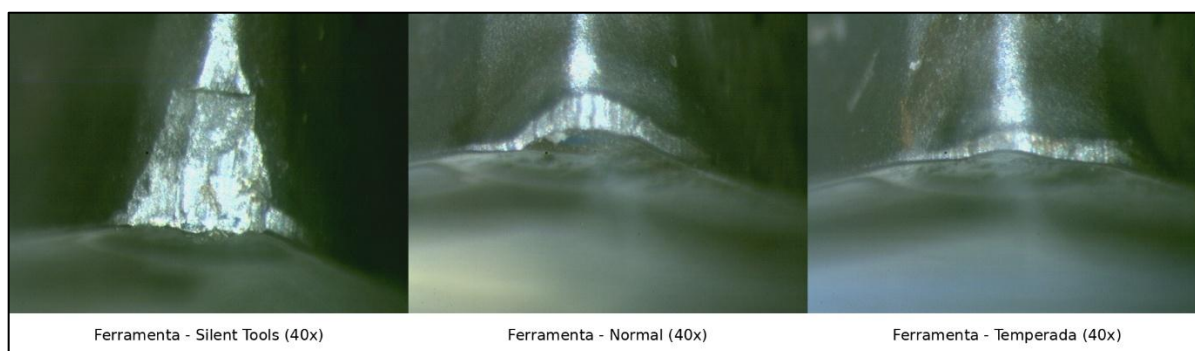


Fonte: O autor (2026).

Quando analisadas sob maior ampliação (40x) com auxílio do Estereoscópio da Entex do tipo Trinocular de Medição Universal, modelo TNE-10B, com resolução de 640 x 480, disponível no laboratório da UCS, conforme exposto na Figura 29, nota-se a formação de uma faixa de desgaste de flanco (VB) bem delineada, regular e uniforme ao longo da região de folga da ferramenta. O aspecto estriado e paralelo dessa região comprova que o mecanismo preponderante atuante foi a abrasão mecânica. Este fenômeno ocorre devido à ação microcortante de partículas duras ou carbonetos presentes na matriz do material da peça, que riscam a superfície da ferramenta, comportamento este condicionado às propriedades microestruturais decorrentes dos tratamentos térmicos do material (Ferraresi, 2018; Fonseca, 2024). Segundo os critérios estabelecidos normativamente pela ABNT NBR ISO 3685 (1993), o crescimento controlado e uniforme do desgaste de flanco por abrasão representa o comportamento ideal e estável para a vida útil da ferramenta, justificando os menores índices de rugosidade obtidos nessas condições, além das diferentes condições de ferramentas empregadas e suas propriedades mecânicas, que assim, diminuíram a rugosidade.

Na Figura 29, confirma-se um valor significativamente maior de largura de desgaste de flanco (VB), acompanhado por um fenômeno de lascamento (*chipping*) na quina de corte. O lascamento caracteriza-se como uma falha microestrutural de natureza mecânica (fratura localizada), comumente associada a picos de vibração mecânica no sistema, fadiga cíclica do inserto ou variações bruscas de carregamento (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014). Embora os sistemas de amortecimento passivo busquem mitigar tais efeitos, regimes severos transientes de carga mecânica podem induzir este tipo de avaria localizada (Digernes, 2024; Sandvik Coromant, 2024).

Figura 29 — Fotos do flanco



Fonte: O autor (2026).

A análise visual e microscópica dos insertos após os ensaios de usinagem evidencia diferenças significativas nos padrões de desgaste entre as ferramentas avaliadas, refletindo diretamente o comportamento dinâmico de cada condição de corte. Observa-se que as ferramentas com menor estabilidade apresentaram desgaste mais acentuado na aresta de corte, o que contribuiu diretamente para a degradação do acoplamento tribológico e do acabamento.

Por outro lado, as ferramentas que apresentaram melhor desempenho dinâmico demonstraram maior capacidade de preservar a integridade da aresta de corte ao longo do processo, resultando em superfícies com maior homogeneidade e menores valores de rugosidade. Esse comportamento pode ser atribuído à redução das vibrações e das instabilidades durante a usinagem, o que implica menores solicitações mecânicas cíclicas e menor concentração de tensões na região da aresta ativa, além de uma dissipação térmica mais uniforme (Altintas, 2012; Machado *et al.*, 2017).

Nas ferramentas que apresentaram esse desempenho inferior (condição da *Silent Tools™*), o aumento pronunciado dos parâmetros de rugosidade correlaciona-se à intensificação desses mecanismos de falha. A combinação de elevadas cargas mecânicas, gradientes térmicos significativos e presença de excitações dinâmicas no sistema ferramenta-peça acelerou a degradação da aresta. O desgaste acentuado e o lascamento da aresta resultam em modificações geométricas locais, alterando os ângulos efetivos de corte e comprometendo a consistência do processo de formação de cavaco (Astakhov, 2018; Trent e Wright, 2000). Como consequência, verifica-se o aumento da irregularidade na remoção de material, refletido na superfície da peça através de sulcos mais profundos, marcas periódicas de vibração e padrões superficiais heterogêneos, os quais alteram diretamente os parâmetros de rugosidade definidos nas normas técnicas (ABNT NBR ISO 4287, 2017; Galdemawla, 2020).

Dessa forma, a análise integrada entre os aspectos de desgaste macro/microscópico das ferramentas e os parâmetros de rugosidade evidencia uma relação consistente entre a integridade da aresta de corte, os mecanismos tribológicos atuantes e a qualidade superficial final da peça usinada. Tal abordagem reforça a importância do controle das variáveis de processo, da seleção adequada das ferramentas e da mitigação de vibrações, visando não apenas à maximização da vida útil do inserto, mas também à otimização do desempenho funcional da superfície gerada (Santos, 2015; Silva, 2020).

4.3 ANÁLISE DE RIGIDEZ

A rigidez das ferramentas foi analisada com base no modelo de viga em balanço, conforme utilizado por Altintas (2012), sendo a rigidez de flexão dada pela equação:

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia e L é comprimento da ferramenta. Para seção circular, tem-se:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3)$$

Onde d é o diâmetro da seção circular. Juntando as duas equações tem-se:

$$K = \frac{3E \times \pi d^4}{64 L^3} \quad (4)$$

Como E é o mesmo para as três ferramentas, tem-se que:

$$K \propto \frac{d^4}{L^3} \quad (5)$$

O resultado dos cálculos para cada uma das ferramentas encontra-se na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Rigidez relativa das três ferramentas.

Ferramenta	Diâmetro (mm)	Comprimento X (mm)	Rigidez relativa
Ferramenta 1	32	164,70	0,235
Ferramenta 2	30	164,70	0,181
Ferramenta 3	25	228,30	0,033

Fonte: O autor (2026).

Tönshoff e Denkena (2013) ressaltam que a rigidez e o amortecimento devem ser analisados de maneira conjunta, uma vez que ambos contribuem para a estabilidade do sistema de usinagem. Enquanto a rigidez reduz as deflexões causadas pelas forças de corte, o amortecimento limita a propagação das vibrações. Dessa forma, ferramentas que combinam adequadamente essas características tendem a apresentar melhor desempenho em operações com elevados comprimentos em balanço.

A análise da rigidez das ferramentas, baseada no modelo de viga em balanço, demonstra que o comportamento observado experimentalmente não pode ser explicado exclusivamente pela geometria. Embora a Ferramenta 3 apresente a menor rigidez estrutural, devido ao menor diâmetro e maior comprimento em balanço, ela apresentou desempenho superior em termos de rugosidade. Esse resultado evidencia a importância do amortecimento dinâmico, que atua dissipando energia vibratória, contudo, sua eficiência depende da correta adaptação às condições de operação.

Por outro lado, a Ferramenta 1, apesar de apresentar maior rigidez teórica, apresentou pior desempenho. Isso demonstra que a rigidez, isoladamente, não é suficiente para garantir estabilidade em processos de usinagem, sendo necessário considerar também a capacidade de dissipação de energia do sistema. Este comportamento é típico de sistemas sem amortecimento adequado, nos quais as vibrações comprometem significativamente o acabamento. Esse resultado reforça a necessidade de utilização de soluções que reduzam a amplitude das oscilações durante o corte.

A Ferramenta 2 apresentou um comportamento ideal, combinando rigidez adequada com estabilidade dinâmica, o que resultou em baixos valores de rugosidade e ondulação. Logo, o aumento da rigidez estrutural pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a estabilidade do processo. A baixa variabilidade observada indica que esse tipo de abordagem proporciona maior previsibilidade e confiabilidade.

Assim, a qualidade superficial deve ser analisada em múltiplas escalas: enquanto os parâmetros R_a e R_z refletem a microgeometria da superfície, os parâmetros W_a e W_z indicam a presença de irregularidades de maior escala, associadas principalmente a fenômenos dinâmicos. Nesse sentido, a Ferramenta 2 apresentou o melhor desempenho global, pois apresentou baixos valores em ambas as escalas, indicando um processo estável.

A Ferramenta 3, por sua vez, apresentou bom desempenho quanto ao acabamento, mas valores de ondulação relativamente maiores, o que sugere a presença de vibrações residuais. Esse comportamento está alinhado com a literatura sobre absorvedores dinâmicos, que indica

que esses sistemas são mais eficientes dentro de faixas específicas de frequência, podendo apresentar menor eficiência fora dessas condições.

De forma geral, os resultados demonstram que o controle das vibrações é um fator determinante para a qualidade superficial, e que a análise conjunta de rugosidade e ondulação fornece uma compreensão mais completa do comportamento do processo de usinagem. Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a forte influência das características dinâmicas do sistema de usinagem sobre a qualidade superficial. A comparação entre as ferramentas demonstrou que o controle das vibrações é um fator determinante para a obtenção de superfícies com baixa rugosidade.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência das características construtivas e da capacidade de amortecimento de diferentes ferramentas na qualidade superficial obtida em operações de torneamento interno. Para isso, foram comparadas uma ferramenta convencional, uma ferramenta com corpo temperado por indução e uma ferramenta antivibratória *Silent Tools*TM, utilizando os parâmetros de rugosidade R_a e R_z e os parâmetros de ondulação W_a e W_z como indicadores de desempenho.

Os resultados demonstraram que a Ferramenta 1 apresentou o pior desempenho entre as condições avaliadas, registrando valores médios de $R_a = 7,224 \mu\text{m}$, $R_z = 35,750 \mu\text{m}$, $W_a = 2,721 \mu\text{m}$ e $W_z = 10,294 \mu\text{m}$. Esses resultados evidenciam maior suscetibilidade às vibrações e menor estabilidade dinâmica do sistema durante a usinagem.

A Ferramenta 2 apresentou o melhor desempenho global, com valores médios de $R_a = 2,302 \mu\text{m}$, $R_z = 11,864 \mu\text{m}$, $W_a = 1,330 \mu\text{m}$ e $W_z = 3,575 \mu\text{m}$. Em comparação à Ferramenta 1, observou-se redução de aproximadamente 68% nos valores de R_a , 67% em R_z , 51% em W_a e 65% em W_z . Além disso, essa condição apresentou a menor dispersão entre as amostras usinadas, indicando elevada repetibilidade e maior robustez do processo frente às variações operacionais.

A Ferramenta 3 apresentou comportamento distinto. Considerando todas as amostras medidas, inclusive a Amostra 4, foram obtidos os valores médios de $R_a = 3,056 \mu\text{m}$, $R_z = 16,836 \mu\text{m}$, $W_a = 1,894 \mu\text{m}$ e $W_z = 4,748 \mu\text{m}$. Mesmo nessa condição, os resultados permaneceram inferiores aos da Ferramenta 1 para todos os parâmetros avaliados. Entretanto, a Amostra 4 apresentou aumento significativo da rugosidade em decorrência de um lascamento da aresta de corte do inserto, resultando em valores atípicos quando comparados aos demais ensaios.

Ao desconsiderar a Amostra 4, os valores médios da Ferramenta 3 passam para aproximadamente $R_a = 1,95 \mu\text{m}$, $R_z = 11,86 \mu\text{m}$, $W_a = 2,19 \mu\text{m}$ e $W_z = 4,45 \mu\text{m}$. Nessa condição, a ferramenta apresentou os menores valores de rugosidade entre todas as condições experimentais, porém manteve níveis de ondulação superiores aos observados na Ferramenta 2. Esse comportamento sugere que o sistema de amortecimento interno da tecnologia *Silent Tools*TM foi particularmente eficiente na redução das irregularidades de pequena escala associadas à rugosidade, mas menos eficaz no controle das componentes responsáveis pela ondulação superficial.

A ocorrência do lascamento observada na Ferramenta 3 constitui um resultado relevante do estudo e não deve ser interpretada apenas como uma anomalia experimental. Tal fenômeno demonstra que o desempenho de ferramentas com sistemas complexos de amortecimento também está sujeito à integridade da aresta de corte e às condições operacionais do processo. Dessa forma, a análise foi realizada considerando tanto os resultados completos quanto os resultados sem o ponto discrepante, permitindo uma avaliação mais abrangente do comportamento da ferramenta.

A comparação conjunta dos parâmetros de rugosidade e ondulação demonstrou que a qualidade superficial não pode ser avaliada exclusivamente por meio dos parâmetros R_a e R_z . Em diversas situações observadas neste trabalho, baixos níveis de rugosidade não estiveram necessariamente associados aos menores níveis de ondulação. Esse resultado confirma a importância da utilização conjunta dos parâmetros W_a e W_z para uma caracterização mais completa da superfície usinada e do comportamento dinâmico do processo.

Conclui-se, portanto, que a combinação entre elevada rigidez estrutural e capacidade de amortecimento constitui a estratégia mais eficaz para o controle de vibrações em operações de torneamento interno. Dentro das condições avaliadas, a Ferramenta 2 apresentou o melhor equilíbrio entre rugosidade, ondulação, estabilidade e repetibilidade dos resultados, configurando-se como a alternativa de melhor desempenho global entre as ferramentas investigadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização do monitoramento em tempo real das vibrações durante a usinagem, bem como a avaliação do comportamento das ferramentas sob diferentes velocidades de corte, avanços, profundidades de corte e condições de refrigeração, visando correlacionar diretamente os fenômenos vibratórios com os parâmetros de rugosidade e ondulação obtidos.

REFERÊNCIAS

- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 1302: Especificações geométricas de produtos (GPS) - Indicação de estados de superfície em desenhos técnicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 25178-1: Especificações geométricas de produtos (GPS) - Textura superficial: Área - Parte 1: Indicação de textura superficial**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685: Tempo de vida da ferramenta para ensaio com ferramentas de torneamento de ponta única**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287: Especificações geométricas de produtos (GPS) - Textura superficial: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de textura superficial**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASTAKHOV, V. P. **Geometry of Single-point Turning Tools and Drills: Fundamentals and Practical Applications**. London: Springer, 2018.
- BIASIBETTI, G. R. S.; NUNES, R. M.; CAVALER, L. C. de C.; ROCHA, A. da S. Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento. *Revista Matéria*, v. 24, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/220438>>. Acesso em: 20 jun. 2026.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.
- CABAU, A. F.; COSSICH, L. G. **Análise de vibração no torneamento interno utilizando ferramentas com relação comprimento diâmetro alta**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10387>>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- CAMPOS RUBIO, J. C.; VELTEN FILHO, A. G. **Textura superficial: avaliação da rugosidade através de imagens digitais**. Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Usinagem e Automação, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/COF_161066493.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.
- CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação dos Metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2018.

CHEUNG, C. F.; LEE, W. B. Characterization of nanosurface generation in single-point diamond turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 2, p. 135-143, 2002.

COUTO, A. F. A. **Proposta de modelagem do comportamento vibracional de ferramentas longas durante o torneamento interno**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em <<https://app.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Proposta%20Modelagem%20do%20Comportamento%20Vibracional%20de%20Ferramentas%20Longas%20durante%20Torneamento%20Interno.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DIGERNES, A. Silent Tools: a história das ferramentas que não vibram. **Usinagem Brasil**, 15 jun. 2024. Disponível em <<https://www.usinagem-brasil.com.br/58329-silent-tools-a-historia-das-ferramentas-que-nao-vibram/>>. Acesso em: 4 out. 2025.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

FONSECA, V. Estudo da Influência dos Tratamentos Térmicos de Recozimento Pleno, Normalização e Têmpera sobre a Microestrutura, Dureza e Propriedades Magnéticas do Aço AISI 1030. **Ufpb.br**, 2024. Disponível em <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/33855>>. Acesso em: 01 abril. 2026.

GADELMAWLA, E. Prediction of Surface Roughness of Turning Operations Using Computer Vision., " **Mansoura Engineering Journal**: v. 35 : Iss. 3 , Article 4, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.125054>>. Acesso em 01 abr. 2026.

GONÇALVES JÚNIOR, M.; SANCHEZ, L. E. de A.; INGRACI NETO, R. R.; FORTULAN, C. A.; BUKVIC, G.; FOSCHINI, C. R. Análise do acabamento superficial e força de corte no torneamento de alumina a verde. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 480-490, 2015. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/3Qp5qk8WjYr8s6sLkLk8R8w/>>. Acesso em: 17 maio 2026.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools**. 2. ed. Genebra: ISO, 1993.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 7. ed. Londres: Pearson, 2014.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Berlin: Springer, 2011.

LARA, A. P. **Análise das vibrações no processo de torneamento interno da liga de alumínio 6351-T6**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2984>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. da. **Mecânica da Usinagem**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

METAL ZENITH. 1080 steel Properties and key applications explained. Disponível em <<https://metalzenith.com/pt/blogs/steel-properties/1080-steel-properties-and-key-applications-explained>>. Acesso em 20 abr. 2026.

NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14886/1/d.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PEREIRA, L. C. R. Estratégias de Controle Ativo de Vibrações em Máquinas-Ferramenta. **Revista Brasileira de Engenharia de Manufatura**, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2022.

PRADO, A. F. **Amortecimento de Vibrações em Estruturas Mecânicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

SANDVIK COROMANT. **CoroDrill® DS20 - indexable drilling with 4 to 7xDC capacity**. Sandvik Coromant, 2024. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/internal-turning>>. Acesso em: 20 abr. 2026.

SANDVIK COROMANT. **Silent Tools™ para torneamento: elimine a vibração no torneamento interno**. Sandvik Coromant do Brasil S.A., 2024. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/tools/turning-tools/internal-turning-tools/silent-tools-turning/how-to-use-silent-tools-turning>>. Acesso em: 4 out. 2025.

SANDVIK COROMANT. **Torneamento interno**. Sandvik Coromant do Brasil S.A., 2024. Disponível em <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/internal-turning>>. Acesso em: 4 out. 2025.

SANTOS, R. G. **Redução de vibrações mecânicas em processos de torneamento: desenvolvimento de uma metodologia para controle dinâmico**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-24092015-091753/publico/RaphaelGaldinodosSantosDEFINITIVO.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SILVA, M. B. Absorvedores Dinâmicos de Vibração: Teoria e Aplicações. **Ciência & Engenharia**, v. 29, n. 1, p. 78-92, 2020.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 8. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

STEMMER, C E. **Ferramentas de Corte II**. 7. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

TÖNSHOFF, H. K.; DENKENA, B. **Basics of Cutting and Abrasive Processes**. Berlin: Springer, 2013.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface and Nanometrology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

ANEXO A – ANÁLISE QUÍMICA



Análise Química

Método: Fe-10-F 30/06/2026 16:11:27
 Comment: Aço Baixa Liga - F Concentrações
 No. da Amostra: Liga: Id. da Amostra:
01404 SAE 1080 F1A3
 Obs.:

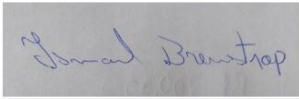
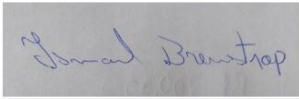
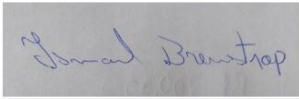
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
min	0.740		0.600					
< x > (6)	0.770	0.333	0.798	0.0096	0.0052	0.146	0.0216	0.0628
max	0.880		0.900	0.0400	0.0500			

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
min								
< x > (6)	0.0410	0.0155	0.0492	0.0041	0.257	0.0032	< 0.0100	0.0096
max								

	Sn	Mg	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%
min								
< x > (6)	0.0074	0.0036	0.0071	0.0022	< 0.0050	0.0040	< 0.0030	< 0.0020
max								

	Te	B	Zn	La	Fe			
	%	%	%	%	%			
min								
< x > (6)	0.0038	0.0023	0.0013	< 0.0010	97.4			
max								

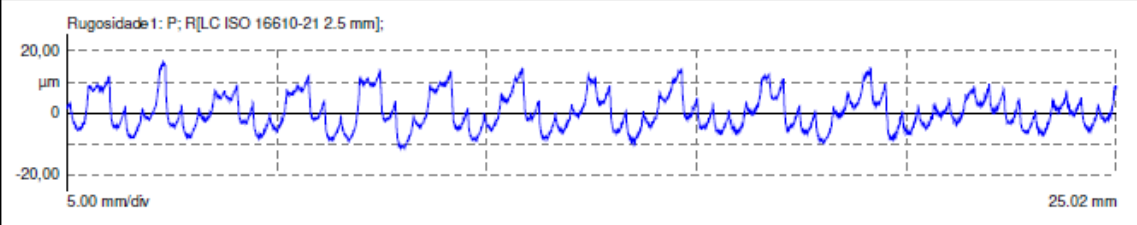
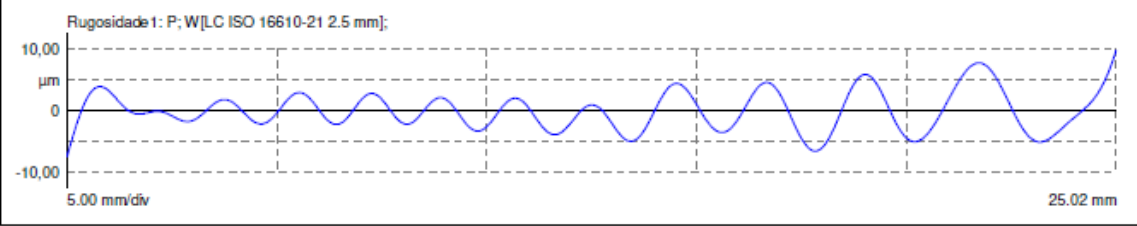
ANEXO B- CERTIFICADO DE NORMALIZAÇÃO

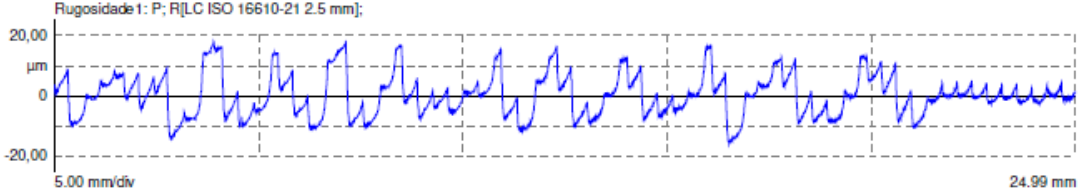
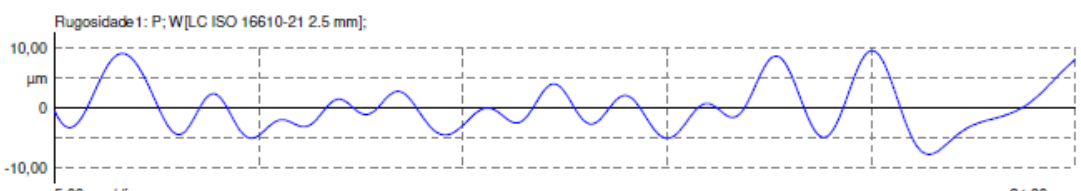
	NITRION DO BRASIL LTDA (FILIAL) DOUTOR DORIS JOSE SCHLATTER - CENTRO FELIZ - RS CNPJ: 04.905.537/0002-32 CEP: 95770.000 Fone: (51) 3093-8550 Fax: (51) 3093-8550																				
CERTIFICADO DE QUALIDADE (Quality Certificate) Conforme DIN EN 10204-3.1																					
Nº OP 52532	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Cliente: (Customer)</td> <td>1438 - SUSIN FRANCESCUTTI METALURGICA LTDA</td> </tr> <tr> <td>Endereço: (Address)</td> <td>RUA LUIZ FRANCESCUTTI, 232 - PIONEIRO</td> </tr> <tr> <td>Cep - Cidade: (City)</td> <td>95042-595 - Caxias do Sul</td> </tr> </table>	Cliente: (Customer)	1438 - SUSIN FRANCESCUTTI METALURGICA LTDA	Endereço: (Address)	RUA LUIZ FRANCESCUTTI, 232 - PIONEIRO	Cep - Cidade: (City)	95042-595 - Caxias do Sul														
Cliente: (Customer)	1438 - SUSIN FRANCESCUTTI METALURGICA LTDA																				
Endereço: (Address)	RUA LUIZ FRANCESCUTTI, 232 - PIONEIRO																				
Cep - Cidade: (City)	95042-595 - Caxias do Sul																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Peça (Part)</td> <td colspan="3">99000010 97 - 50999998 MANUTENCAO DE MAQUINAS (ACESSORIOS) 15 UN ID. - PARA NORMALIZACAO PARA TESTE DE USINAGEM.</td> </tr> <tr> <td>Material (Material)</td> <td>SAE 1080</td> <td>Desenho (Drawing)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Quantidade (Quantity)</td> <td>15,0000</td> <td>Peso (Weight)</td> <td>55,0000 Kg</td> </tr> <tr> <td>Especificações (Specifications)</td> <td></td> <td>Pedido de Compra (Purchase Order)</td> <td>197521</td> </tr> <tr> <td>NF de Entrada (Customer Invoice)</td> <td>213514</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Peça (Part)	99000010 97 - 50999998 MANUTENCAO DE MAQUINAS (ACESSORIOS) 15 UN ID. - PARA NORMALIZACAO PARA TESTE DE USINAGEM.			Material (Material)	SAE 1080	Desenho (Drawing)		Quantidade (Quantity)	15,0000	Peso (Weight)	55,0000 Kg	Especificações (Specifications)		Pedido de Compra (Purchase Order)	197521	NF de Entrada (Customer Invoice)	213514		
Peça (Part)	99000010 97 - 50999998 MANUTENCAO DE MAQUINAS (ACESSORIOS) 15 UN ID. - PARA NORMALIZACAO PARA TESTE DE USINAGEM.																				
Material (Material)	SAE 1080	Desenho (Drawing)																			
Quantidade (Quantity)	15,0000	Peso (Weight)	55,0000 Kg																		
Especificações (Specifications)		Pedido de Compra (Purchase Order)	197521																		
NF de Entrada (Customer Invoice)	213514																				
Verificações - Vickers conforme DIN EN ISO 6507-1																					
Serviços (Services): NORMALIZAÇÃO Prot. de Carga (Charge Protocol) 7613;																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Especificações (Specifications)</th> <th style="text-align: left;">Resultados (Results)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dureza Superficial: (Surface Hardness) 0</td> <td>Dureza Superficial: (Surface Hardness) LIB. CONF. PROCESSO</td> </tr> <tr> <td>Camada Nitretada: (Layer Depth)</td> <td>Camada Nitretada: (Layer Depth)</td> </tr> <tr> <td>Camada Efetiva (Effective Layer)</td> <td>Camada Efetiva (Effective Layer)</td> </tr> <tr> <td>Camada Branca (White Layer)</td> <td>Camada Branca (White Layer)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Nr. Peças testadas (Quantity of tested Parts)</td> </tr> </tbody> </table>	Especificações (Specifications)	Resultados (Results)	Dureza Superficial: (Surface Hardness) 0	Dureza Superficial: (Surface Hardness) LIB. CONF. PROCESSO	Camada Nitretada: (Layer Depth)	Camada Nitretada: (Layer Depth)	Camada Efetiva (Effective Layer)	Camada Efetiva (Effective Layer)	Camada Branca (White Layer)	Camada Branca (White Layer)	Nr. Peças testadas (Quantity of tested Parts)		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Durômetro (Hardness tester)</td> </tr> <tr> <td>D04 DUROMETRO SCHUTZ BUCHHEIM</td> </tr> <tr> <td>Certificadora: MITEC INSTRUMENTOS IN</td> </tr> <tr> <td>Nº. Certificado de Calibração: 33697/25</td> </tr> <tr> <td>Data de Calibração Próx. Calibração</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">02/12/2025</td> <td style="text-align: center;">02/12/2026</td> </tr> </table>	Durômetro (Hardness tester)	D04 DUROMETRO SCHUTZ BUCHHEIM	Certificadora: MITEC INSTRUMENTOS IN	Nº. Certificado de Calibração: 33697/25	Data de Calibração Próx. Calibração	02/12/2025	02/12/2026	
Especificações (Specifications)	Resultados (Results)																				
Dureza Superficial: (Surface Hardness) 0	Dureza Superficial: (Surface Hardness) LIB. CONF. PROCESSO																				
Camada Nitretada: (Layer Depth)	Camada Nitretada: (Layer Depth)																				
Camada Efetiva (Effective Layer)	Camada Efetiva (Effective Layer)																				
Camada Branca (White Layer)	Camada Branca (White Layer)																				
Nr. Peças testadas (Quantity of tested Parts)																					
Durômetro (Hardness tester)																					
D04 DUROMETRO SCHUTZ BUCHHEIM																					
Certificadora: MITEC INSTRUMENTOS IN																					
Nº. Certificado de Calibração: 33697/25																					
Data de Calibração Próx. Calibração																					
02/12/2025	02/12/2026																				
Foto da Peça (Part Picture)																					
																					
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;"> Assinatura:  ISMAEL BREMSTROP AMARAL 03/02/2026 11:04 </td> <td style="width: 70%;"></td> </tr> </table>		Assinatura:  ISMAEL BREMSTROP AMARAL 03/02/2026 11:04																			
Assinatura:  ISMAEL BREMSTROP AMARAL 03/02/2026 11:04																					
Versão.: 202502 RCertQualNitrion																					

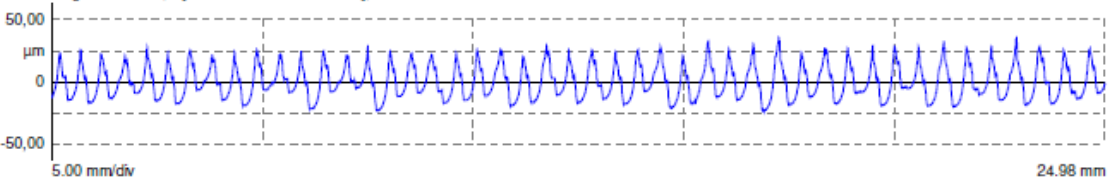
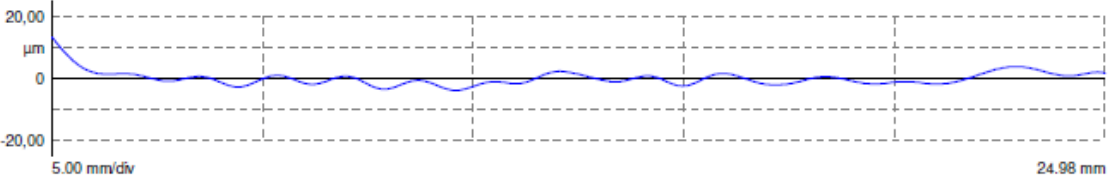
ANEXO C- CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

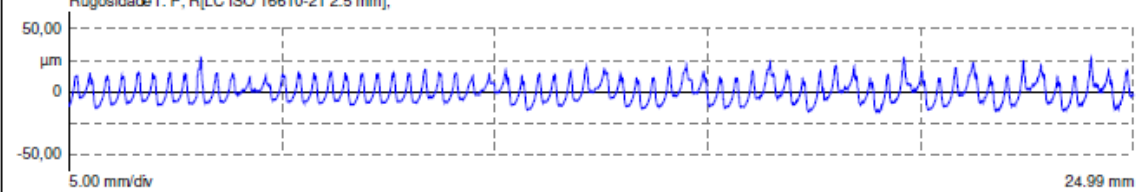
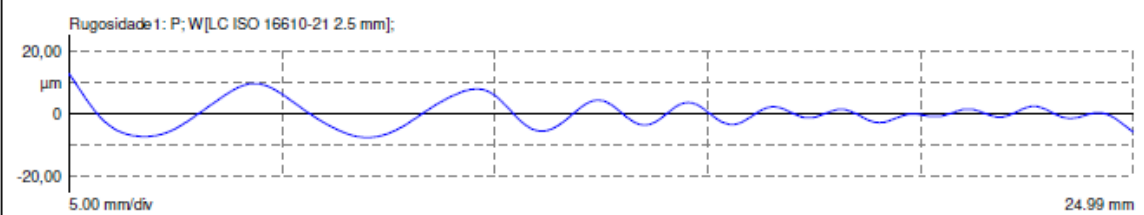
	MarWin 12.20-06 SP 1	Protocolo de calibração	07/04/2026 1 11:07:55 Controlador:
	Peça:	Nº do desenho:	Passo do processo:
Comentários:			
Usuário do MarWin: Administrator Data: 07.04.2026 Hora: 11:07:54 Intervalo de validade: 300 dia(s) Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Número de fábrica: ----- Sistema de prova: MFW-250 B:2 Número de fábrica: 1502 Unidade do braço de prova: BFW A 4-45-2/90 21137 Ponta de prova: 4 mm Procedimento de calibração: Ra em padrão de rugosidade calibrado Eixo de avanço: X Valor nominal: 0.827 µm Número de medições: 3 Curso de apalpe Lt: 5.60 mm Cursos de medição N: 5 Comprimento de onda limite Lc: 0.80 mm Comprimento de onda limite Ls: 2.5 µm Velocidade de medição Vt: 0.5 mm\ls Campo de medição: 1 Amplitude das medições: 0.021 µm Valor de correção: 4.6 %			

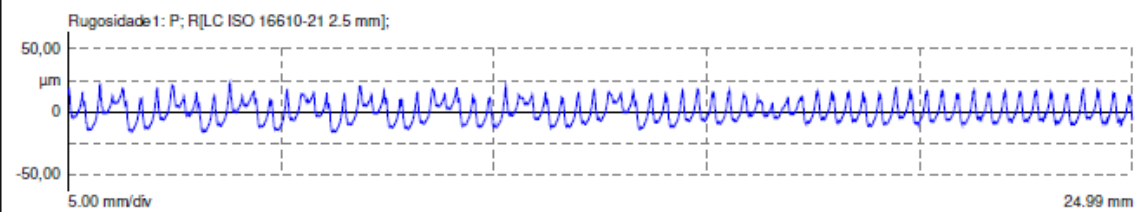
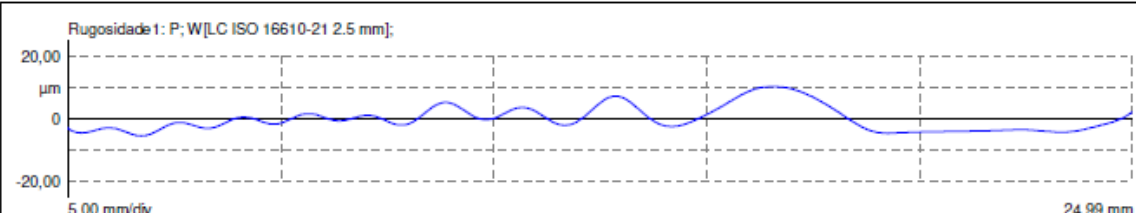
ANEXO D – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 1

		MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 11:18:22 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
Peça: Ferramenta 1		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 1	
Medicao 1					
Comentários:					
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 25.02 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50047		
					
					
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Ra	4.7494 µm	0.0000			0.0000
Rz	22.9422 µm	0.0000			0.0000
R Sk	0.496	0.000			0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Wa	2.4925 µm	0.0000			0.0000
Wz	10.8360 µm	0.0000			0.0000

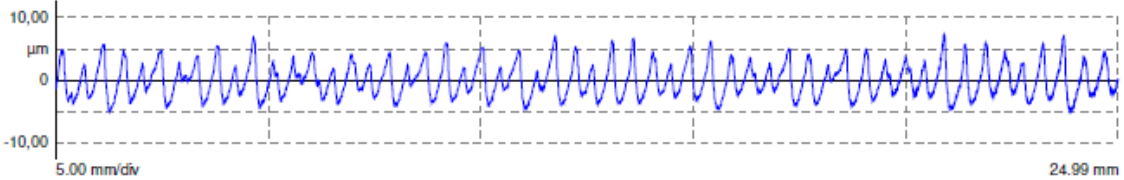
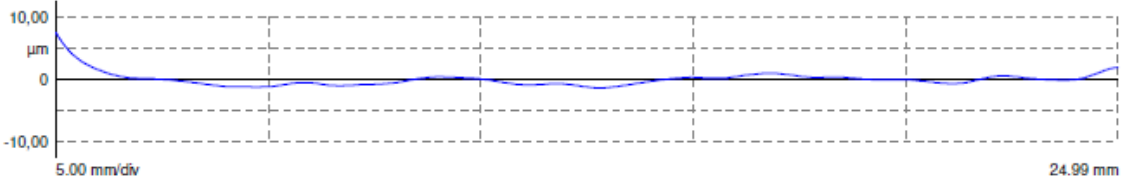
	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 11:35:50 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
	Peça: Ferramenta 1 N° do desenho:		Passo do processo: Amostra 2	
Medicao 1				
Comentários:				
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137		Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49976		
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 				
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 				
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Ra	5.3627 µm	0.0000		0.0000
Rz	29.2948 µm	0.0000		0.0000
R Sk	0.406	0.000		0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Wa	3.0560 µm	0.0000		0.0000
Wz	12.4634 µm	0.0000		0.0000

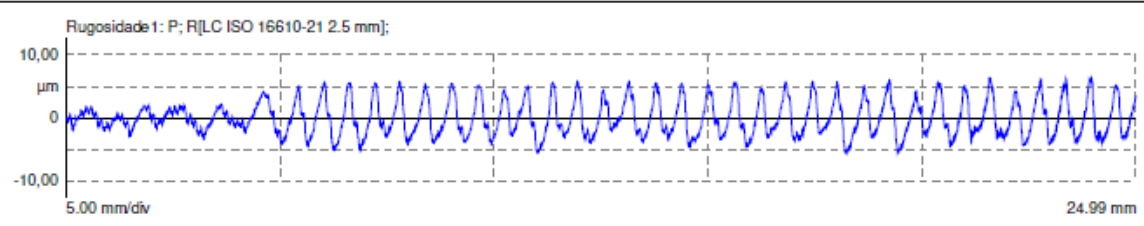
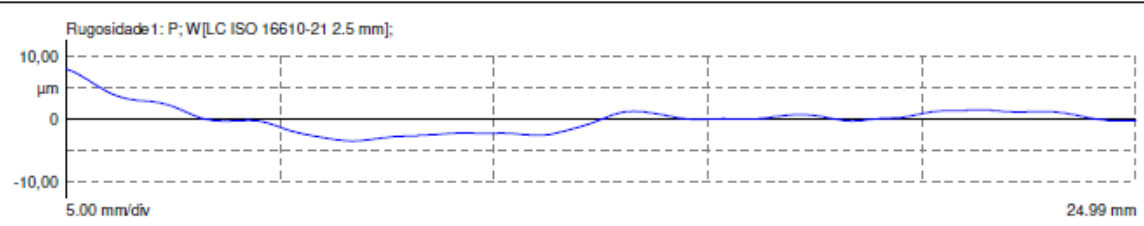
	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 11:42:20 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:																																			
Peça: Ferramenta 1		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 3																																			
Medicao 1																																							
Comentários:																																							
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.98 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49967																																				
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 																																							
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="5">Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];</th> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>11.1480 µm</td> <td>0.0000</td> <td></td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>53.3215 µm</td> <td>0.0000</td> <td></td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>R Sk</td> <td>0.336</td> <td>0.000</td> <td></td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <th colspan="5">Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];</th> </tr> <tr> <td>Wa</td> <td>1.5785 µm</td> <td>0.0000</td> <td></td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>Wz</td> <td>7.0661 µm</td> <td>0.0000</td> <td></td> <td>0.0000</td> </tr> </table>					Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					Ra	11.1480 µm	0.0000		0.0000	Rz	53.3215 µm	0.0000		0.0000	R Sk	0.336	0.000		0.000	Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					Wa	1.5785 µm	0.0000		0.0000	Wz	7.0661 µm	0.0000		0.0000
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];																																							
Ra	11.1480 µm	0.0000		0.0000																																			
Rz	53.3215 µm	0.0000		0.0000																																			
R Sk	0.336	0.000		0.000																																			
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];																																							
Wa	1.5785 µm	0.0000		0.0000																																			
Wz	7.0661 µm	0.0000		0.0000																																			

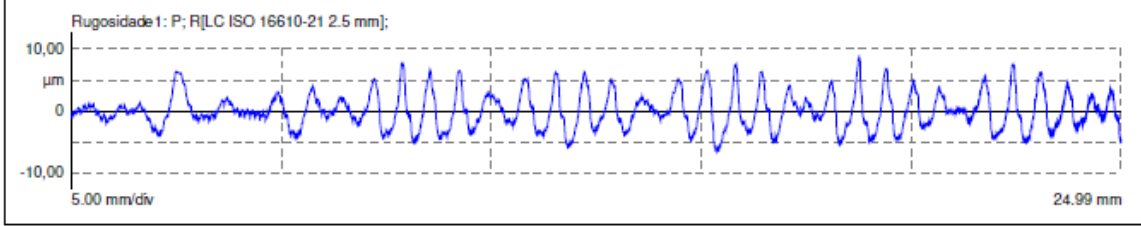
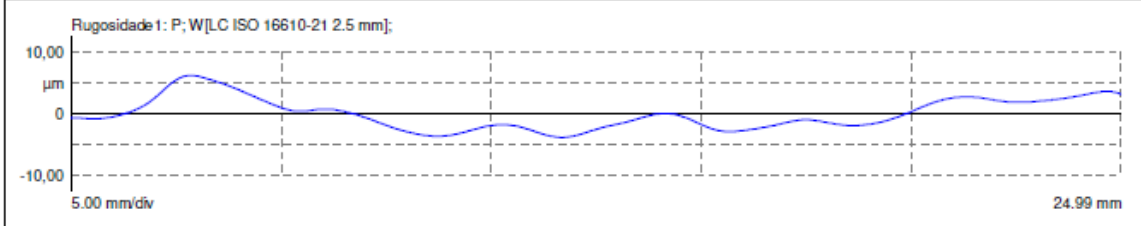
	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 11:48:00 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
Peça: Ferramenta 1		N° do desenho: Amostra 4		
Medicao 1				
Comentários:				
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49973	
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
				
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
				
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Ra	7.3806 µm	0.0000		0.0000
Rz	38.0319 µm	0.0000		0.0000
R Sk	0.367	0.000		0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Wa	3.1833 µm	0.0000		0.0000
Wz	12.1335 µm	0.0000		0.0000

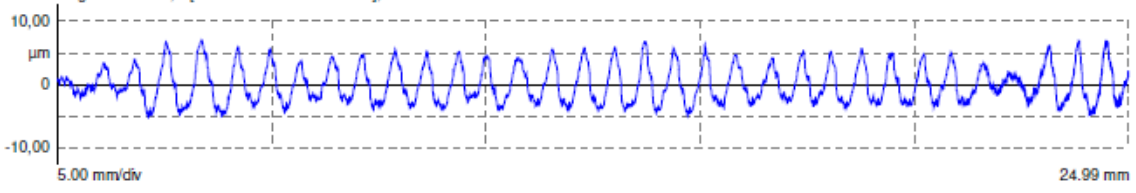
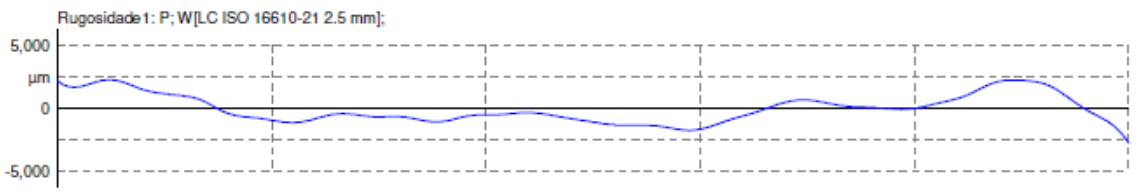
 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional				07/04/2026 1 11:53:49 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 1		N° do desenho:		Passo do processo: Amostra 5			
Medicao 1							
Comentários:							
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137				Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49973			
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 							
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 							
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Ra	7.3161 µm	0.0000					0.0000
Rz	34.5377 µm	0.0000					0.0000
R Sk	0.254	0.000					0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Wa	3.1308 µm	0.0000					0.0000
Wz	8.8868 µm	0.0000					0.0000

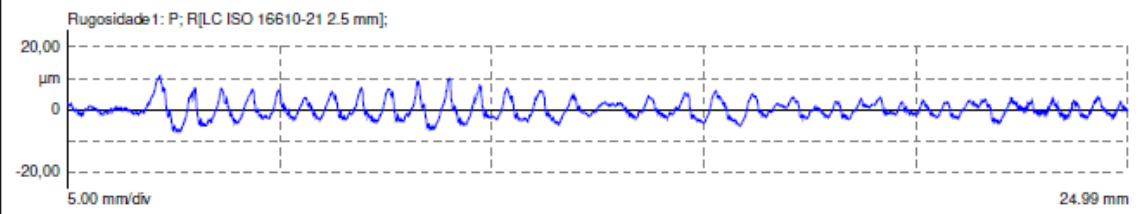
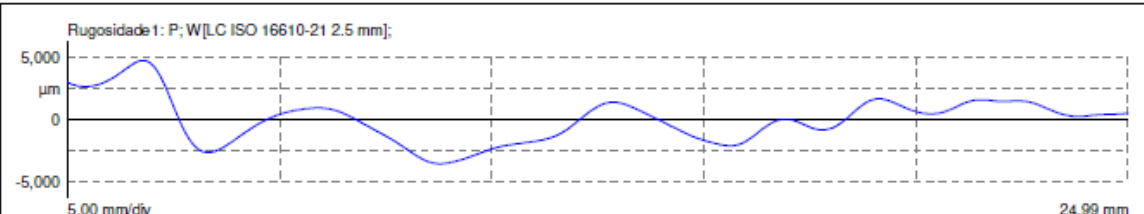
ANEXO E – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 2

 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		 07/04/2026 1 11:59:50 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 2		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 1	
Medicao 1					
Comentários:					
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49982		
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Ra	2.1941 µm	0.0000			0.0000
Rz	11.4481 µm	0.0000			0.0000
R Sk	0.359	0.000			0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Wa	0.6744 µm	0.0000			0.0000
Wz	3.1221 µm	0.0000			0.0000

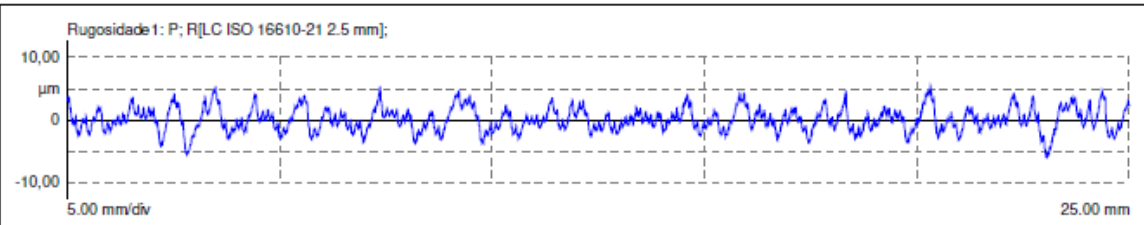
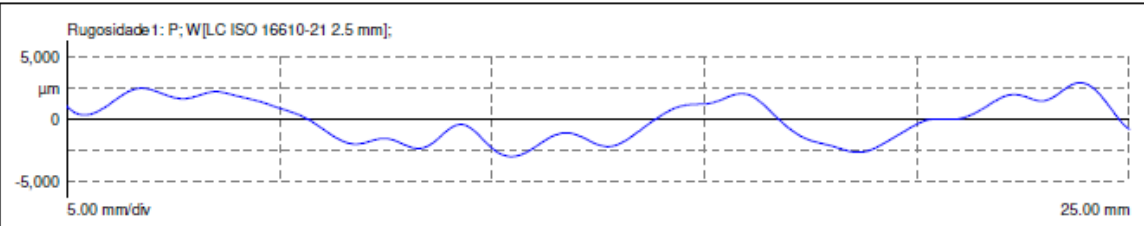
 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		 07/04/2026 1 12:06:02 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 2		N° do desenho:		Passo do processo: Amostra 2	
Medicao 1					
Comentários:					
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49982		
Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Ra	2.3030 µm	0.0000			0.0000
Rz	10.6409 µm	0.0000			0.0000
R Sk	0.360	0.000			0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Wa	1.5115 µm	0.0000			0.0000
Wz	3.6447 µm	0.0000			0.0000

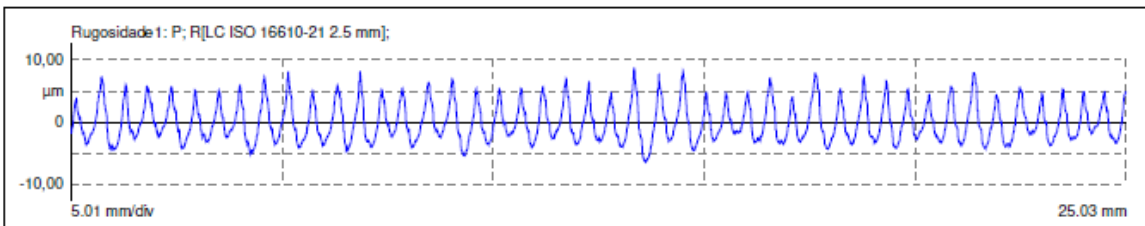
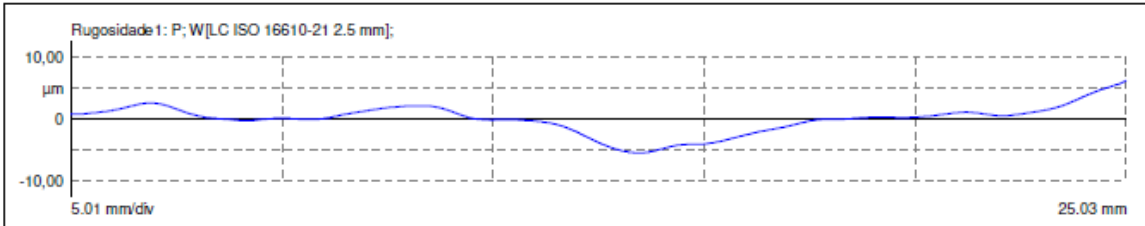
	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 12:12:30 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
	Peça: Ferramenta 2 Medicao 1		N° do desenho: Passo do processo: Amostra 3	
Comentários:				
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49974	
				
				
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Ra	2.2369 µm	0.0000		0.0000
Rz	12.8512 µm	0.0000		0.0000
R Sk	0.388	0.000		0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Wa	2.1177 µm	0.0000		0.0000
Wz	4.3888 µm	0.0000		0.0000

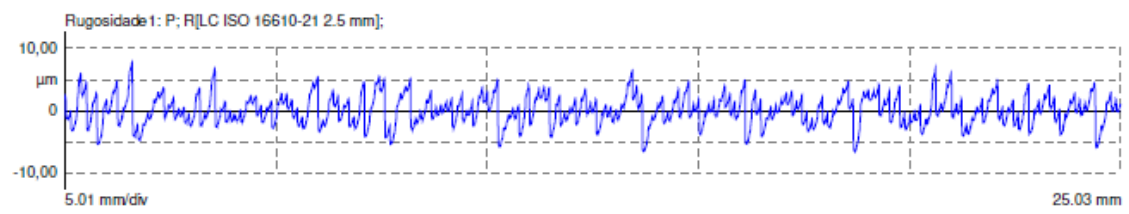
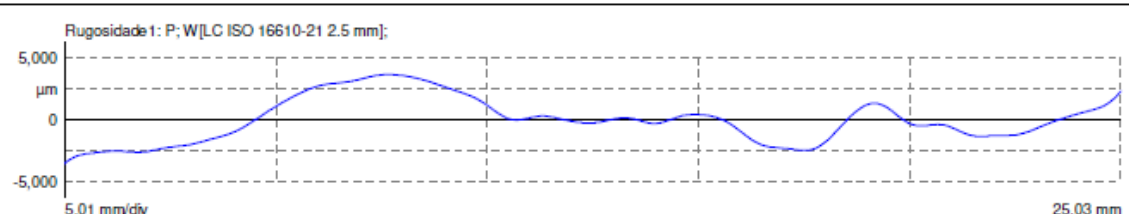
 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		 07/04/2026 1 12:18:12 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 2 Medicao 1		N° do desenho: 		Passo do processo.: Amostra 4	
Comentários:					
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49978		
Rugosidade 1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Rugosidade 1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm]; 					
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Ra	2.4571 µm	0.0000			0.0000
Rz	11.2713 µm	0.0000			0.0000
R Sk	0.429	0.000			0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Wa	0.9391 µm	0.0000			0.0000
Wz	2.5246 µm	0.0000			0.0000

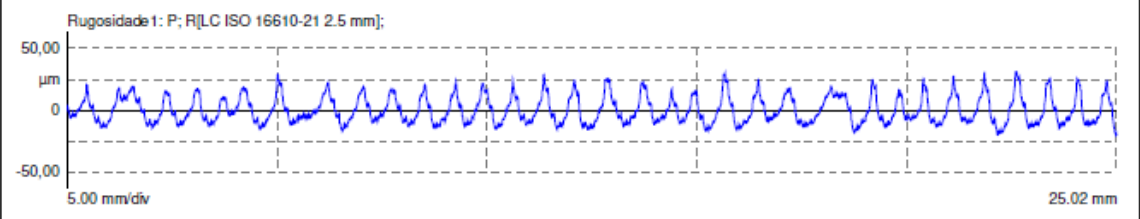
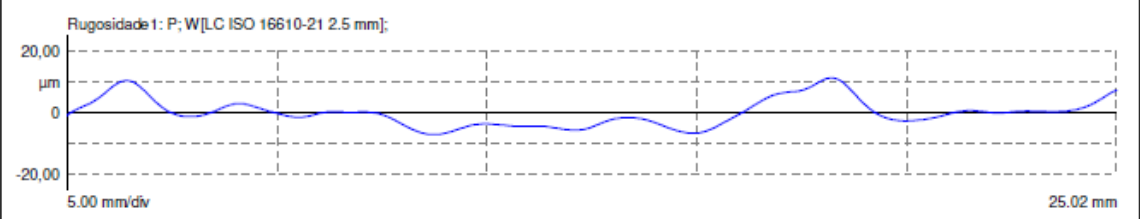
	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		07/04/2026 1 12:24:42 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
Peça: Ferramenta 2		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 5
Medicao 1				
Comentários:				
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137			Lt: 24.99 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 49974	
Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
				
Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
				
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Ra	2.2844 µm	0.0000		0.0000
Rz	13.1463 µm	0.0000		0.0000
R Sk	0.535	0.000		0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Wa	1.4316 µm	0.0000		0.0000
Wz	4.1393 µm	0.0000		0.0000

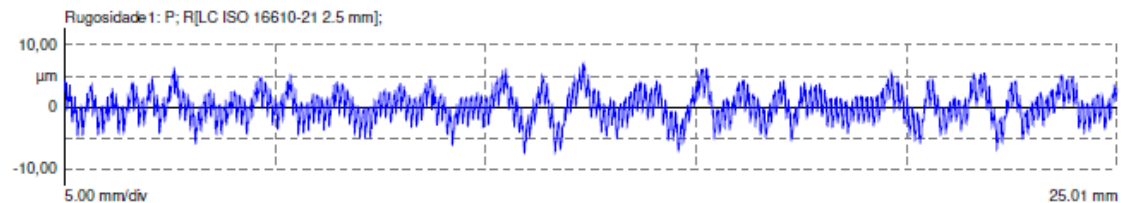
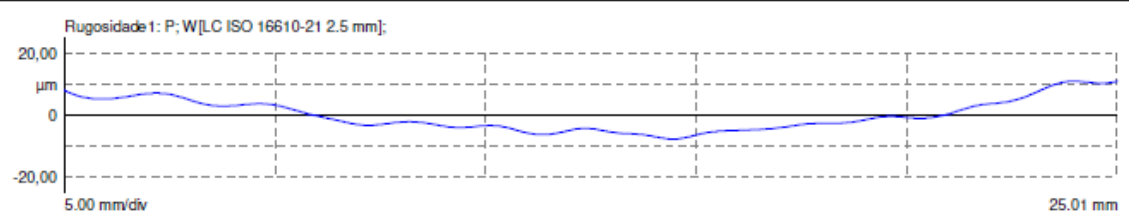
ANEXO F – MEDIÇÕES DE AMOSTRAS DA FERRAMENTA 3

 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional				07/04/2026 1 13:36:07 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 3		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 1			
Medicao 1							
Comentários:							
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137				Lt: 25.00 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50005			
							
							
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Ra	1.4653 µm	0.0000					0.0000
Rz	9.4968 µm	0.0000					0.0000
R Sk	0.101	0.000					0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Wa	1.4832 µm	0.0000					0.0000
Wz	3.5989 µm	0.0000					0.0000

	MarWin 12.20-06 SP 1	Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		30/04/2026 1 12:50:29 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:
	Peça: Ferramenta 3 Medicao 1	N° do desenho:	Passo do processo.: Amostra 2	
Comentários:				
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137		Lt: 25.03 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50053		
				
				
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Ra	2.5804 µm	0.0000		0.0000
Rz	13.1553 µm	0.0000		0.0000
R Sk	0.528	0.000		0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];				
Wa	1.6022 µm	0.0000		0.0000
Wz	4.1316 µm	0.0000		0.0000

 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional				30/04/2026 1 12:57:10 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 3 Medicao 1		N° do desenho:		Passo do processo: Amostra 3			
Comentários:							
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-45-2/90 21137				Lt: 25.03 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-250.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50052			
							
							
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Ra	1.8668 µm	0.0000					0.0000
Rz	12.3531 µm	0.0000					0.0000
R Sk	0.025	0.000					0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Wa	1.3868 µm	0.0000					0.0000
Wz	3.2025 µm	0.0000					0.0000

 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional				30/04/2026 1 14:21:27 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 3		N° do desenho:		Passo do processo: Amostra 4			
Medicao 1							
Comentários:							
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-90-2/90 21137				Lt: 25.02 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-500.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50031			
							
							
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Ra	9.2517 µm	0.0000					0.0000
Rz	46.5837 µm	0.0000					0.0000
R Sk	0.571	0.000					0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];							
Wa	3.2945 µm	0.0000					0.0000
Wz	10.3774 µm	0.0000					0.0000

 MarWin 12.20-06 SP 1		Susin Francescutti Qualidade Laboratório Dimensional		 30/04/2026 1 14:12:20 Controlador: Vinicius Hennig Assinatura:	
Peça: Ferramenta 3		N° do desenho:		Passo do processo.: Amostra 5	
Medicao 1-1					
Comentários:					
Aparelho de medição: MarTalk Unidade de avanço: DriveUnit.GD 25 Apalpador: BFW A 4-90-2/90 21137			Lt: 25.01 mm Ls: 8.00 µm VB: +/-500.0 µm Vt: 0.50 mm/s Pontos: 50014		
					
					
Parâmetros de rugosidade - Rugosidade1: P; R[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Ra	1.8938 µm	0.0000			0.0000
Rz	12.4322 µm	0.0000			0.0000
R Sk	-0.095	0.000			0.000
Parâmetros de ondulação - Rugosidade1: P; W[LC ISO 16610-21 2.5 mm];					
Wa	4.3866 µm	0.0000			0.0000
Wz	6.9326 µm	0.0000			0.0000

ANEXO G – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 1

Ferramenta 1	Medição	Ra	Rz	Rsk	Wa	Wz
Amostra 1	Medição 1	4,749	22,942	0,496	2,493	10,836
	Medição 2	4,985	24,008	0,550	2,946	12,374
	Medição 3	5,050	23,857	0,575	2,560	9,512
Média	-	4,928	23,602	0,540	2,666	10,907
Amostra 2	Medição 1	5,362	29,294	0,406	3,056	12,463
	Medição 2	5,368	29,309	0,404	3,057	12,452
	Medição 3	5,369	29,201	0,405	3,066	12,515
Média	-	5,366	29,268	0,405	3,060	12,477
Amostra 3	Medição 1	11,148	53,321	0,336	1,578	7,066
	Medição 2	11,130	53,189	0,337	1,593	7,080
	Medição 3	11,124	53,135	0,337	1,569	7,074
Média	-	11,134	53,215	0,337	1,580	7,073
Amostra 4	Medição 1	7,380	38,031	0,367	3,183	12,133
	Medição 2	7,375	38,043	0,367	3,194	12,200
	Medição 3	7,374	37,996	0,367	3,190	12,164
Média	-	7,376	38,023	0,367	3,189	12,166
Amostra 5	Medição 1	7,316	34,537	0,254	3,130	8,886
	Medição 2	7,314	34,693	0,254	3,122	8,864
	Medição 3	7,310	34,692	0,253	3,083	8,785
Média	-	7,313	34,641	0,254	3,112	8,845
Média Total	-	7,224	35,750	0,381	2,721	10,294

ANEXO H – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 2

Ferramenta 2	Medição	Ra	Rz	Rsk	Wa	Wz
Amostra 1	Medição 1	2,194	11,448	0,359	0,674	3,122
	Medição 2	2,193	11,483	0,358	0,674	3,140
	Medição 3	2,193	11,479	0,358	0,678	3,101
Média	-	2,193	11,470	0,358	0,675	3,121
Amostra 2	Medição 1	2,303	10,640	0,360	1,515	3,644
	Medição 2	2,303	10,627	0,361	1,487	3,576
	Medição 3	2,303	10,667	0,360	1,506	3,581
Média	-	2,303	10,645	0,360	1,503	3,600
Amostra 3	Medição 1	2,236	12,851	0,388	2,117	4,388
	Medição 2	2,235	12,841	0,386	2,139	4,445
	Medição 3	2,238	12,957	0,388	2,108	4,421
Média	-	2,236	12,883	0,387	2,121	4,418
Amostra 4	Medição 1	2,457	11,271	0,429	0,939	2,524
	Medição 2	2,455	11,252	0,428	0,984	2,546
	Medição 3	2,454	11,318	0,428	0,969	2,562
Média	-	2,455	11,280	0,428	0,964	2,544
Amostra 5	Medição 1	2,284	13,146	0,535	1,431	4,139
	Medição 2	2,341	12,992	0,526	1,354	4,207
	Medição 3	2,340	12,993	0,527	1,375	4,230
Média	-	2,322	13,044	0,529	1,387	4,192
Média Total	-	2,302	11,864	0,413	1,330	3,575

ANEXO I – TABELA DAS MEDIÇÕES DAS AMOSTRAS DA FERRAMENTA 3

Ferramenta 3	Medição	Ra	Rz	Rsk	Wa	Wz
Amostra 1	Medição 1	1,465	9,496	0,101	1,483	3,598
	Medição 2	1,472	9,504	0,099	1,424	3,545
	Medição 3	1,467	9,503	0,106	1,468	3,567
Média	-	1,468	9,501	0,102	1,458	3,570
Amostra 2	Medição 1	2,580	13,155	0,528	1,602	4,131
	Medição 2	2,578	13,167	0,531	1,577	4,124
	Medição 3	2,577	13,193	0,532	1,587	4,098
Média	-	2,578	13,172	0,530	1,589	4,118
Amostra 3	Medição 1	1,866	12,353	0,025	1,386	3,202
	Medição 2	1,866	12,337	0,025	1,382	3,205
	Medição 3	1,867	12,369	0,026	1,390	3,169
Média	-	1,866	12,353	0,025	1,386	3,192
Amostra 4	Medição 1	9,251	46,583	0,571	3,294	10,377
	Medição 2	9,251	46,674	0,570	3,255	10,392
	Medição 3	9,249	46,384	0,571	3,310	10,277
Média	-	9,250	46,547	0,571	3,286	10,349
Amostra 5	Medição 1	1,894	12,432	0,095	4,386	6,932
	Medição 2	1,893	12,413	0,098	4,258	6,862
	Medição 3	1,892	12,453	0,096	4,299	6,913
Média	-	1,893	12,433	0,096	4,314	6,902
Média Total	-	3,411	18,801	0,265	2,407	5,626