

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

CRISTIAN ARNALDO FALLER

**ANÁLISE DO FRESAMENTO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR COM
NIÓBIO**

**CAXIAS DO SUL
2026**

CRISTIAN ARNALDO FALLER

**ANÁLISE DO FRESAMENTO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR COM
NIÓBIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels.

**CAXIAS DO SUL
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F194a Faller, Cristian Arnaldo

Análise do fresamento de ligas de ferro fundido nodular com nióbio
[recurso eletrônico] / Cristian Arnaldo Faller. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Alexandre Fassini Michels.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Usinagem. 2. Ferro fundido. 3. Nióbio. I. Michels, Alexandre Fassini,
orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.7

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

CRISTIAN ARNALDO FALLER

ANÁLISE DO FRESAMENTO DE LIGAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR COM NIÓBIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica
Área de concentração: Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels.

Aprovado em 10 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Viecelli
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Rodrigo Panozzo Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Fernando Moreira Bordin
Universidade Federal de Santa
Catarina

**CAXIAS DO SUL
2026**

RESUMO

O presente estudo analisou o fresamento de ferro fundido nodular com nióbio (0,18-0,347%) através de matriz ortogonal de Taguchi L_9 , variando profundidade de corte, velocidade de corte, avanço de corte e percentual de Nb (%wt), onde identificou-se avanço de corte (f_z) é absolutamente dominante para rugosidade ($p < 0,05$). Os níveis ótimos foram $f_z = 0,10$ mm/dente, Nb = 0,25%, $V_c = 250$ m/min e profundidade de corte dinâmica (1,5 mm em 1-5 metros \rightarrow 0,5 mm em 7-9 metros), alcançando $R_a = 1,1$ μ m e $VB_{m\acute{a}x} = 0,09$ mm aos 9 metros. Mecanismos de desgaste transitam sequencialmente de abrasão, adesão e possível oxidação, comprovando que otimização eficaz requer ajuste dinâmico de parâmetros conforme evolução do corte, e não apenas uma seleção estática de níveis.

Palavras-chave: Nióbio; Ferro fundido nodular; Fresamento de faceamento; Rugosidade; Desgaste; Método Taguchi; MEV/EDS

ABSTRACT

This study analyzed the milling of niobium-alloyed ductile iron (0.18–0.347 wt.% Nb) using Taguchi L₉ orthogonal array, varying depth of cut, cutting speed, feed rate, and Nb content, which identified feed rate (fz) as absolutely dominant for surface roughness ($p < 0.05$). Optimal levels were Fz = 0.10 mm/tooth, Nb = 0.25%, Vc = 250 m/min, and dynamic depth of cut (1.5 mm during 1–5 meters → 0.5 mm during 7–9 meters), achieving Ra = 1.1 μ m and VBmax = 0.09 mm at 9 meters. Wear mechanisms transitioned sequentially abrasion, adhesion and probably oxidation, demonstrating that effective optimization requires dynamic parameter adjustment as machining progresses, rather than static level selection alone.

Keywords: Niobium; Nodular cast iron; Face milling; Roughness; Wear; Taguchi method; SEM/EDS

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1 - Resultados de propriedades mecânicas com adição de Nb.</u>	17
<u>Figura 2 - Resultados de propriedades mecânicas com e sem adição de Nb.</u>	18
<u>Figura 3 - Resultados de resistência a tração (a) e resistência ao escoamento (b) com e sem adição de Nb.</u>	19
<u>Figura 4 – Tipos de fresamento</u>	22
<u>Figura 5 – Velocidades de avanço, profundidade de corte e largura de corte.</u>	24
<u>Figura 6 – Exemplos de fresas interiças</u>	24
<u>Figura 7 – Representação dos gumes principal e secundário</u>	25
<u>Figura 8 – Representação esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste.</u>	27
<u>Figura 9 – Mecanismos de Desgaste de ferramentas x Temperatura.</u>	27
<u>Figura 13 - Rugosidade média Ra</u>	33
<u>Figura 14 - Perfis geométricos com mesmo valor de Ra</u>	34
<u>Figura 15 – Comparação da rugosidade mensurada e teórica</u>	35
<u>Figura 16 – Fluxograma do processo experimental.</u>	38
<u>Figura 17 - Dimensão do bloco Y.</u>	39
<u>Figura 18 – Adaptação de morsa no centro de usinagem, modelagem em CAD/CAM</u>	41
<u>Figura 19 – Adaptação de morsa no centro de usinagem</u>	42
<u>Figura 20 – Cabeçote de fresa Ø32mm</u>	42
<u>Figura 21 – Ferramenta de usinagem utilizada no fresamento</u>	43
<u>Figura 22 – Centro de usinagem DOOSAN DNM6700</u>	44
<u>Figura 23 – Rugosímetro portátil modelo SJ-310</u>	47
<u>Figura 24 – Microscópio MEV</u>	48
<u>Figura 25 – Microscópio óptico Dino</u>	49
<u>Figura 26 – Análise de rugosidade média (Ra) x comprimento usinado dos testes.</u>	52
<u>Figura 27 – Análise de rugosidade (Rz) x comprimento usinado dos testes</u>	54
<u>Figura 28 - Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x profundidade de corte: 1 até 9 metros</u>	56
<u>Figura 29- Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x velocidade de corte: 1 até 9 metros</u>	57

<u>Figura 30- Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x avanço de corte: 1 até 9 metros</u>	59
<u>Figura 31 - Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x nióbio: 1 até 9 metros</u>	60
<u>Figura 32 – Análise de desgaste x comprimento usinado dos testes.</u>	62
<u>Figura 33 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x profundidade de corte: 1 até 9 metros</u>	65
<u>Figura 34 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x velocidade de corte: 1 até 9 metros</u>	66
<u>Figura 36 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x nióbio: 1 até 9 metros</u>	69
<u>Figura 37 – Desgaste da ferramenta do gume secundário (S') com 9 metros usinados</u>	71
<u>Figura 38 – Desgaste da ferramenta do gume principal (S) com 9 metros usinados</u>	72
<u>Figura 39 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 3 (Face)</u>	73
<u>Figura 40 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 3 (Lateral)</u>	74
<u>Figura 41– Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 8 (Face)</u>	75
<u>Figura 42 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 8 (Lateral)</u>	76
<u>Figura 43 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 4 (Face)</u>	77
<u>Figura 44 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 4 (Lateral)</u>	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da liga de FN com Nióbio.	40
Tabela 2 - Variáveis de análise e seus níveis	45
Tabela 3 – Parâmetros de usinagem utilizados nos processos da RIO (Know-How).	45
Tabela 4 - Arranjo da matriz ortogonal de Taguchi.	45
Tabela 5 – Composição química	50
Tabela 6 – ANOVA de Taguchi com a variável Rugosidade	55
Tabela 7 – ANOVA de Taguchi com a variável desgaste	64
Tabela 8 – Dados experimentais de rugosidade e desgaste	85
Tabela 9 – Dados da matriz de Pearson de rugosidade e desgaste	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI Instituto Americano do Ferro e do Aço (sigla em inglês)

ASTM Associação Americana para Testes e Materiais (sigla em inglês)

NBR Norma Brasileira

UCS Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CONTEXTO DO TRABALHO DE PESQUISA	12
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.1. OBJETIVO GERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. FERRO FUNDIDO	15
3.1.1. Ferro fundido nodular	15
3.1.2. Nióbio em ferro fundido nodular	16
3.2. USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR	20
3.2.1. Fresamento e o processo de formação do cavaco	21
3.2.2. Mecanismos de desgaste	25
3.2.3. Comportamento de desgaste	28
3.2.4. Tipos de desgaste	30
3.3. QUALIDADE SUPERFICIAL	33
3.4. MÉTODO TAGUCHI	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1. OBJETO DE ESTUDO	37
4.2. MATERIAIS	39
4.2.1. Corpos de prova	39
4.2.2. Preparação dos corpos de prova	39
4.2.3. Dispositivo de fixação	40
4.2.4. Ferramenta de usinagem	42
4.2.5. Centro de usinagem	44
4.3. MÉTODOS	44
4.4. ENSAIOS E ANÁLISES	46
4.4.1. Análise química das ligas fundidas	46
4.4.2. Análise de rugosidade superficial	46
4.4.3. Análise de desgaste de ferramenta	47
4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA	49
5. RESULTADOS	50
5.1. ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL FUNDIDO	50

5.2. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FERRAMENTA	
50	
5.3. ANÁLISE DE RUGOSIDADE	51
5.4. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE RUGOSIDADE	55
5.5. ANÁLISE DE DESGASTE	61
5.6. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE DESGASTE	63
5.7. ANÁLISE MICROSCÓPICA DE DESGASTE	70
6. CONCLUSÃO	79
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A	85
APÊNDICE B	88

1. INTRODUÇÃO

O processo de obtenção de peças metálicas pela simples solidificação, sem processos subsequentes de forjamento, justifica o interesse do ferro fundido como material estrutural, sendo o segundo material metálico mais utilizado no mundo atrás somente do aço (Pero-Sanz Elorz; Fernández González; Verdeja, 2018). A indústria brasileira de fundição produziu em 2020, 2.250,2 mil toneladas de ferro fundido, estando na 10ª posição no *ranking* global (ABIFA, 2021). Desse total, produziu-se cerca de 55% em ligas de ferro fundido cinzento e 23% em ligas de ferro fundido nodular (Brian Sandalow, 2018).

Os ferros fundidos nodulares têm características relevantes, com uma boa combinação de tensão, ductilidade e tenacidade, sendo comumente utilizado em peças da indústria automotiva. Para obtenção do material fundido, parâmetros de processo como: taxa de resfriamento, composição química e tratamento de fusão, são fundamentais para atingir as propriedades finais (Chikali; Shinde, 2020).

Na busca de obtenção de propriedades mecânicas otimizadas, alguns elementos de liga como Molibdênio, Titânio e Nióbio são utilizados na composição química dos produtos. A microestrutura formada pela adição dos elementos na liga de ferro fundido nodular, influencia nas características mecânicas, térmicas e inclusive na usinabilidade do mesmo (Reis, 2021).

A velocidade de corte é afetada diretamente pela mudança das propriedades do material, ocasionando em muitos casos no desgaste prematuro das ferramentas de usinagem e aumento da ineficiência produtiva, impactando diretamente nos custos de fabricação (Rocha Machado, 2015).

1.1. CONTEXTO DO TRABALHO DE PESQUISA

A Rio Riosulense é uma empresa metalúrgica do segmento de autopeças que fornece produtos da linha leve e pesada para diversas montadoras do mundo, além do setor naval e ferroviário, sendo uma referência no desenvolvimento de ferro e aço.

Devido às novas tendências do mercado, busca constantemente atender as demandas solicitadas, desenvolvendo ligas de ferro fundido com adição de elementos que atinjam as características necessárias.

Com a alta disponibilidade do elemento Nióbio no Brasil, cerca de 98% das jazidas disponíveis no mundo, justifica-se a utilização do mesmo na indústria automobilística e siderúrgica, apesar de seu uso junto dos ferros fundidos ser recente (Brasil, 2019)

O levantamento bibliográfico conduzido na base de dados Scopus, estruturado a partir da combinação dos termos *ductile iron*, *niobium* e *milling*, evidenciou a ausência de pesquisas abordando essa combinação. Mesmo quando considerada apenas a associação entre ferro fundido nodular e nióbio, apresenta uma escassez de trabalhos científicos. Logo, indica que a usinabilidade desse material específico é um campo de estudo recente, o que fundamenta a necessidade de investigações experimentais e teóricas sobre o tema.

Além do fato dos escassos trabalhos reportados na literatura a respeito do tema, vale ressaltar que o gasto com ferramentas de usinagem representa 2-4% do valor do custo direto de usinagem (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Logo, o presente estudo objetiva avaliar o desgaste de ferramenta gerado na operação de fresamento na liga de ferro fundido nodular em distintas concentrações de nióbio. As ligas avaliadas devem combinar as propriedades mecânicas com adequada usinabilidade. Portanto, deseja-se investigar qual a melhor concentração de nióbio que conjugue as propriedades mecânicas com usinabilidade aceitável dentro dos padrões da empresa.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desgaste de ferramenta através do fresamento de uma liga de ferro fundido nodular com adição de nióbio, avaliando a rugosidade gerado no processo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, este trabalho deve primeiramente buscar os seguintes objetivos específicos:

- a) definir as condições e parâmetros de usinagem (máquina, ferramenta, estratégia de usinagem e tipo de ferramenta);
- b) avaliar o desgaste da ferramenta na usinagem em relação às distintas concentrações de Nb nas ligas, velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente;
- c) avaliar a rugosidade, Ra e Rz, nos corpos de prova usinados em relação às distintas concentrações de Nb nas ligas, velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente;
- d) avaliar os resultados obtidos e definir os parâmetros de usinagem com as melhores condições alcançadas para as ligas de estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo a seguir, será apresentado o material de estudo, introduzido as definições de ferro fundido e conceitos de usinagem, além do embasamento complementar, necessário para a condução do estudo.

3.1. FERRO FUNDIDO

O termo "ferro fundido" é utilizado de forma genérica para descrever uma liga ternária composta de ferro, carbono e silício (Fe-C-Si), que pode conter impurezas em quantidades mínimas ($< 0,1\%$) e, comumente, elementos de liga em proporções mais elevadas ($> 0,1\%$). Esta liga pode ser utilizada tanto na condição de bruto de fusão quanto após tratamento térmico (Elliott, 1988). O termo "ferro fundido" não se refere a um único material, mas sim a um grupo de materiais que apresentam diversas combinações de características distintas entre as ligas fundidas (Durand-Charre, 2013).

Em resumo, as propriedades dos ferros fundidos são influenciadas pela forma da precipitação do carbono e pela estrutura da matriz (Elliott, 1988). Os carbonetos contribuem para a dureza e resistência à abrasão, enquanto a grafita contribui para a usinabilidade, amortecimento de vibrações e condutividade térmica.

3.1.1. Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil, é uma liga metálica de ferro e carbono ligado com silício e elementos nodularizantes, como magnésio ou cério, que age na forma da grafita, transformando-a em nódulos.

As propriedades mecânicas geradas proporcionam alta ductilidade e resistência à tração, sendo assim um material versátil e com uma ampla gama de aplicações em várias indústrias, incluindo a de construção civil, automobilística e a de equipamentos pesados.

A ação do magnésio se resume simplesmente à formação de aglomerados. A quantidade efetiva de magnésio incorporada à composição química da liga, uma vez solidificada, é praticamente irrelevante ($0,03-0,05\%$ de Mg). No

entanto, o magnésio produz sub-resfriamento durante a solidificação eutética, com a subsequente tendência à solidificação rápida, e por essa razão o teor de silício entre 2,4 e 2,8% deve ser mais alto do que em ferros fundidos cinzentos lamelares. O teor de carbono equivalente dos ferros fundidos com grafita esferoidal é conveniente que seja ligeiramente hipereutético 4,3 – 4,8% de C para melhorar a capacidade de moldagem e possibilitar a moldagem de peças de geometria complexa. Os percentuais comuns de carbono, entre 3,5 e 3,8% de C, são mais elevados do que nos ferros fundidos cinzentos não ligados (Pero-Sanz Elorz; Fernández González; Verdeja, 2018)

Ligas de ferro fundido nodular com matriz ferrítica exibem valores de limite de resistência situados na faixa de 380 a 450 MPa, acompanhados de alongamento variando entre 10% e 22%. Já os nodulares de matriz perlítica, podem atingir 900 MPa em limite de resistência, com valores de alongamento de 2% (Guesser, 2019) .

Os ferros fundidos nodulares têm conquistado crescente aplicação na engenharia, gradualmente substituindo componentes de ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável, aço fundido e forjado, além de estruturas soldadas.

O uso de elementos de liga no ferro fundido nodular permite o controle e manipulação da constituição de fases, refinamento microestrutural e fortalecimento da solução, logo as propriedades mecânicas são melhoradas e otimizadas para alcançar tanto altas resistências quanto ductilidade (Chen *et al.*, 2017).

3.1.2. Nióbio em ferro fundido nodular

Dentre os elementos de liga, o nióbio vem sendo utilizado na composição de ferro fundido para o controle da microestrutura. Ele possui como estrutura o CCC e temperatura de fusão de 2468 °C. Além disso, forma precipitados durante o tratamento térmico, sendo uma ferramenta para aumentar a resistência de algumas ligas de ferro (Beniwal; Saxena, 2020).

O nióbio demonstra uma alta afinidade com o carbono para formar carbonetos e possui uma solubilidade baixa, especialmente em ligas ferrosas que contêm uma quantidade relativamente elevada de carbono, como os ferros fundidos (Chen *et al.*, 2017).

Com o aumento do teor de nióbio acima de 0,1% em peso, carbonetos de nióbio (NbC) são formados ainda na fase líquida, conhecidos como carbonetos

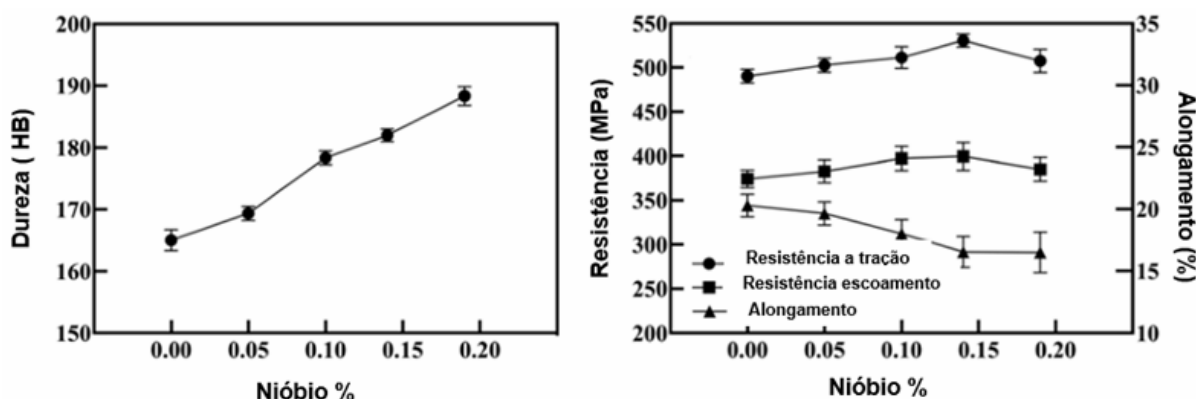
primários, podendo atuar como núcleos para a reação eutética. Isso explica o fato de que as células eutéticas tornam-se finas a partir do aumento dos teores de nióbio (Chen *et al.*, 2020). Se o teor de nióbio exceder 0,2% em peso, os carbonetos primários serão formados em temperaturas mais elevadas, logo tornar-se-ão maiores, aumentando assim a resistência ao desgaste e dureza (Mohrbacher; Leuven, 2018).

Segundo Souza (2014), a adição de 0,47% em peso de nióbio aos ferros fundidos nodulares levou a um aumento de 20% em suas resistências de tração e de rendimento em relação aos valores para os ferros nodulares sem nióbio, devido ao aumento do teor de perlita. Um incremento na ductilidade à tração e na tenacidade Charpy apareceu quando somente 0,23% em peso de Nb foi introduzido (Souza *et al.*, 2014).

A introdução de nióbio em ferros fundidos nodulares pode reduzir o número de nódulos, aumentando, conseqüentemente, a distância de difusão do carbono. Além disso, sua presença leva à diminuição da temperatura da reação eutetóide, o que reduz a taxa de difusão desse elemento (Wang *et al.*, 2024)

Os resultados obtidos por Wang e colaboradores são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Resultados de propriedades mecânicas com adição de Nb.



Fonte: Adaptado de Wang (2024).

No caso dos ferros fundidos nodulares, a adição de nióbio promove elevação da resistência mecânica e da dureza, embora resulte em menor resistência ao impacto e alongamento. Esse comportamento, caracterizado pelo aumento da

dureza e pela redução da tenacidade, está associado à formação de perlita e de carbonetos de nióbio (NbC) (Wang *et al.*, 2024) .

Segundo os ensaios de dureza de Resende (2025), evidenciou-se um efeito positivo da adição de nióbio. As amostras sem o elemento apresentaram dureza Brinell significativamente inferior em comparação às que continham nióbio, sobretudo nas composições com 0,25% e 0,34% de adição. Em média, observou-se um incremento de aproximadamente 20% em relação às amostras isentas de nióbio. Esse aumento está diretamente associado à atuação do nióbio na promoção da formação de perlita na matriz e na precipitação de carbonetos, resultando em maior resistência ao desgaste e em melhor capacidade de suportar cargas aplicadas. Os resultados obtidos por são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Resultados de propriedades mecânicas com e sem adição de Nb.

Fonte: Adaptado de Resende (2025).

Os resultados obtidos demonstram que a adição de nióbio favorece um aumento na resistência ao desgaste. Assim, o emprego do nióbio revela-se

vantajoso em aplicações que demandam maior durabilidade e melhor desempenho superficial.

Com relação a resistência a tração e resistência ao escoamento, aumentou-se em aproximadamente 30 % para as amostras com teor de 0,34 % de nióbio em relação às amostras sem adição (Resende, 2025). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Resultados de resistência a tração (a) e resistência ao escoamento (b) com e sem adição de Nb.

Fonte: Adaptado de Resende (2025).

O aumento é atribuído tanto à capacidade do nióbio de formação de carbonetos de nióbio, como pela capacidade do nióbio de formar uma matriz mais resistente e pelos precipitados, dificultando o movimento de discordâncias (Resende, 2025)

3.2. USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR

A usinabilidade do ferro fundido nodular é diretamente relacionada com as matrizes ferrítica e perlíticas na estrutura. Com o aumento do teor de perlita, a resistência aumenta junto com o desgaste da ferramenta abrasiva, resultando na baixa vida útil da ferramenta. As forças resultantes e a tensão mecânica efetiva resultante do corte da ferramenta aresta são relativamente baixas ao usinar o ferro fundido nodular. Cortes interrompidos podem ser usados sem dificuldade devido à boa propriedade de amortecimento do material. Aumentar levemente a velocidade de corte reduz os valores das resultantes individuais dos componentes de força.

Além disso, rugosidades de pouco menos de $Ra = 1 \mu\text{m}$ são alcançadas no processo de acabamento (Klocke; Kuchle, 2011).

3.2.1. Fresamento e o processo de formação do cavaco

O fresamento é um método de produção de usinagem com movimento circular de corte de uma ferramenta com múltiplos dentes que produz superfícies de peças arbitrárias, sendo que a direção de corte é perpendicular ou em alguns casos transversal ao eixo de rotação da ferramenta (Klocke; Kuchle, 2011). A interação com a matéria-prima resulta na remoção intermitente de material, deixando marcas de corte na superfície (Stemmer, 2005).

A ferramenta, denominada como fresa, possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, sendo que o movimento de avanço é feito pela própria peça, fixada sobre uma mesa que ao incidir sobre a ferramenta, retira o material dando a forma e dimensão desejada (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Devido sua versatilidade na fabricação de várias geometrias, esse processo é amplamente utilizado, já que se consegue uma elevada taxa de remoção de material juntamente com a garantia das tolerâncias exigidas na fabricação (Rocha Machado, 2015).

A classificação das operações de fresamento estão diretamente relacionadas com a posição do eixo árvore em relação a superfície usinada, sendo as principais: fresamento tangencial e fresamento frontal. Klocke e colaboradores (2011) definem que o fresamento frontal é aquele cuja superfície da peça é produzida pela face frontal da ferramenta com a menor aresta de corte. Já o fresamento tangencial é aquele que utiliza a região periférica da aresta de corte (Klocke; Kuchle, 2011).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014) o fresamento tangencial é a operação na qual os dentes ativos estão na região cilíndrica da ferramenta, logo, paralela à superfície gerada. Em contrapartida, o fresamento frontal tem por característica a posição perpendicular dos dentes ativos em relação a superfície usinada.

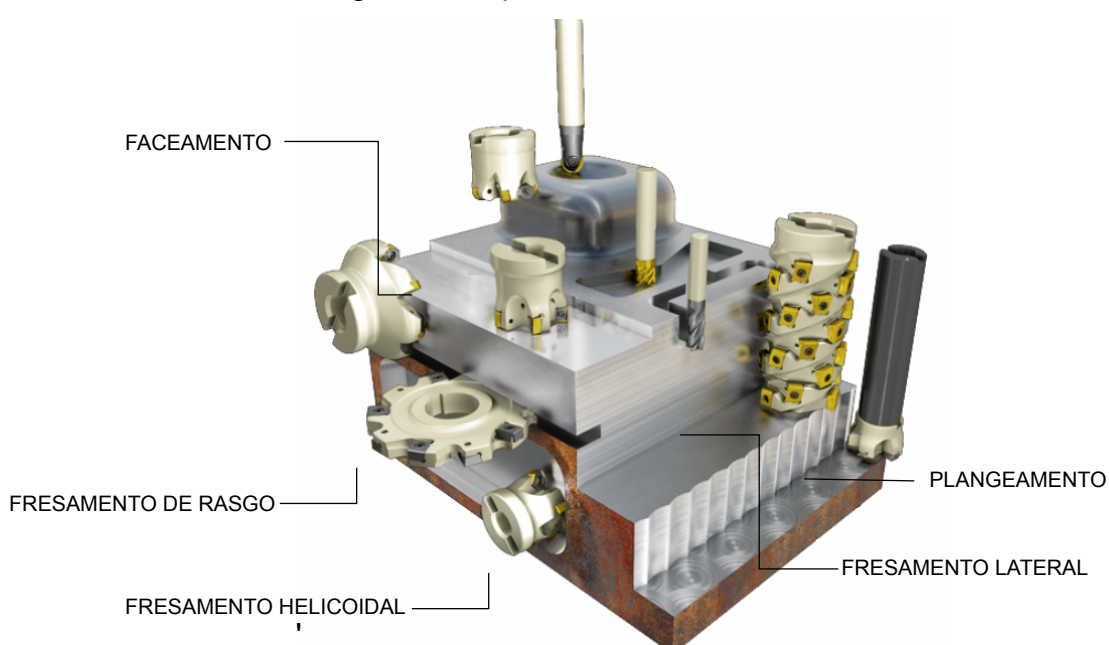
Outro fator importante é relacionado ao sentido de usinagem, sendo caracterizado pelo fresamento concordante e discordante. O primeiro pode ser caracterizado pela direção de avanço da mesa, que é o mesmo do sentido de giro

da ferramenta. No caso do fresamento discordante, os sentidos são opostos (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014) fator está relacionado a formação de cavaco. Segundo Klocke e colaboradores (2011), o fresamento concordante possui como característica a saída do cavaco com espessura zero e entrada com o valor máximo de acordo com a penetração da aresta de corte. Para o fresamento discordante, a premissa é exatamente a contrária (Klocke; Kuchle, 2011). Além disso, as ferramentas utilizadas incluem fresas de metal duro sólidas, fresas e cabeçotes intercambiáveis, além de combinações de aço e metal duro, conforme citado por (Klocke; Kuchle, 2011)

Como visto por Diniz, Marcondes e Coppini (2014) e Stemmer (2005) o processo de usinagem, é possível deslocar a ferramenta em relação à superfície da peça ou movimentar a superfície da peça em relação à ferramenta. Esses elementos estão relacionados ao ato de cortar ou desbastar o material. É imprescindível que tanto a ferramenta quanto a peça atinjam velocidades de corte apropriadas para assegurar o máximo rendimento (Stemmer, 2005).

Os tipos de fresamento são descritos de acordo com as ferramentas e os processos que foram utilizados para obtenção do perfil desejado, processos de fresamento frontal de topo, frontal de face, circunferencial (cavidade, helicoidal), entre outras nomenclaturas (Klocke; König, 1997). A Figura 4 apresenta alguns tipos de processos de fresamento.

Figura 4 – Tipos de fresamento



Fonte: Adaptado de (Iscar do Brasil, 2025).

No processo de fresamento, as ferramentas desempenham um papel determinante ao delimitar as operações. Dentre as ferramentas, as fresas de topo são amplamente utilizadas em diferentes processos de fresamento. Conforme a geometria dessas fresas, é possível realizar uma variedade de operações, como fresamento frontal de face e de topo, geração de ranhuras, cavidades e contornos, entre outras (Klocke; König, 1997).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o fresamento frontal de face pode ser empregado em áreas livres, sendo um dos métodos mais empregados na indústria. Leva-se em consideração alguns fatores, dentre eles que a largura usinada não ultrapasse em 75% o diâmetro da fresa aplicada, além de que o centro da fresa deve estar situada dentro dessa largura, a fim de obter a melhor formação de cavaco possível.

A velocidade de corte é a relação do deslocamento da ferramenta na peça, sobre o tempo, sendo um vetor tangencial instantâneo, resultado da rotação da ferramenta em torno da peça. Logo, a velocidade de corte segue a direção do corte e é representada como V_c (m/min). A velocidade de avanço é alcançada pela translação da ferramenta sobre a peça, sendo sua trajetória radial em relação ao eixo da ferramenta, e é denotada por V_f (mm/min) (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

A grandeza gerada pelo movimento de avanço é o próprio avanço f (mm/curso). No caso de ferramentas com mais de um dente ou gume (z), é caracterizado pela distância de duas superfícies de corte consecutivas, medidas na direção do avanço sendo representada pela equação 1 abaixo:

$$(1)$$

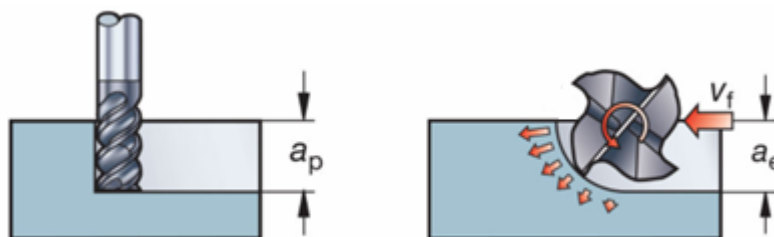
Onde, f_z (avanço por dente) é representado por mm/z.

A penetração passiva, representada por a_p (mm) e conhecida como profundidade de corte no fresamento, refere-se à profundidade em que a ferramenta penetra na peça, sendo perpendicular ao plano de trabalho sendo utilizada em diversas operações, como fresamento, torneamento, furação, entre outras. No caso da penetração de trabalho (a_e) também denominada largura de corte, pode ser caracterizada pela quantidade que a ferramenta penetra na peça, sendo

perpendicular ao movimento de avanço, sendo de suma importância no processo de fresamento (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014; Stemmer, 2005).

Na Figura 5 estão representadas a profundidade de corte, largura de corte, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Figura 5 – Velocidades de avanço, profundidade de corte e largura de corte.



Fonte: Adaptado de (Iscar do Brasil, 2025)

As fresas de topo destacam-se por sua geometria e pela disposição dos gumes, os quais são formados tanto na periferia quanto na face da ferramenta. O número de gumes pode variar de um único até vários (n), dependendo da aplicação específica. Entre as fresas mais comuns, estão aquelas que possuem dois ou quatro cortantes. Além da variação na quantidade de cortes, as fresas podem apresentar diferentes formas de ponta, como reta, semiesférica, toroidal e sólida (Stemmer, 2005). A Figura 6 apresenta alguns exemplos e modelos de fresas inteiriças.

Figura 6 – Exemplos de fresas inteiriças

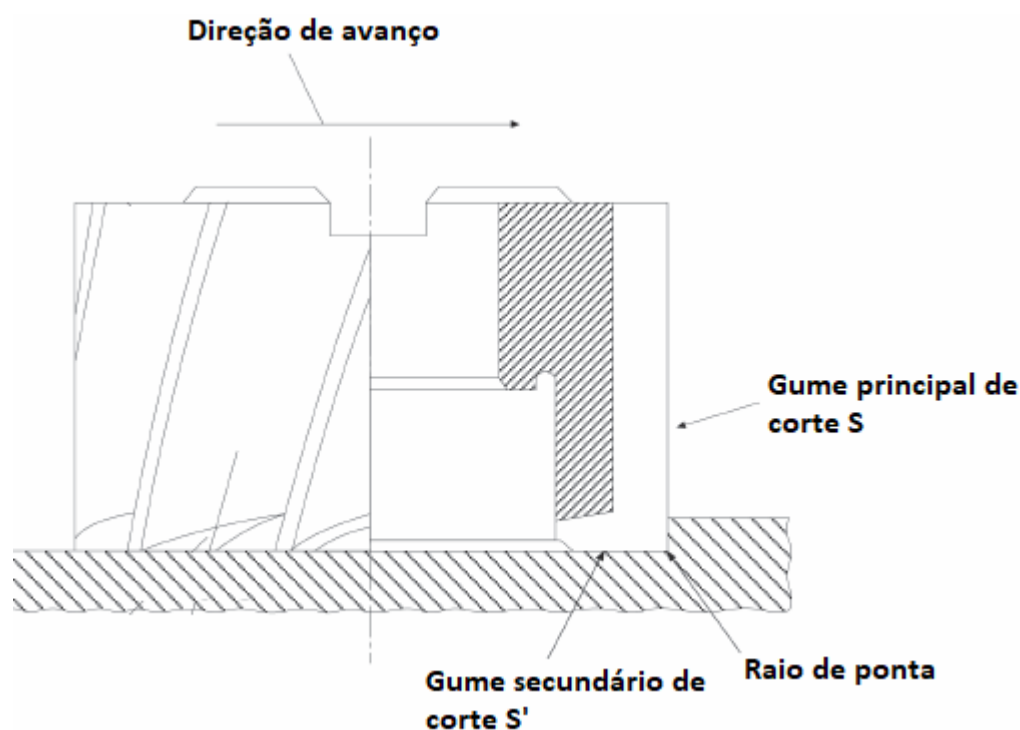


Fonte: Adaptado de (Iscar do Brasil, 2025).

As fresas de metal duro são produzidas por meio do processo de sinterização de carbonetos e um agente ligante, geralmente utilizando carbonetos de tungstênio e, cobalto como material de ligação. As proporções específicas dos componentes da liga influenciam as propriedades e aplicações distintas de cada ferramenta. Após a sinterização, as fresas são retificadas para garantir a definição e precisão exigidas para o tipo de ferramenta (Stemmer, 2005).

A Figura 7, apresenta uma visão esquemática dos gumes de corte: principal (S) e secundário (S').

Figura 7 – Representação dos gumes principal e secundário



Fonte: Adaptado de (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Pode-se definir como gume de corte principal (S) a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal e gume de corte secundário (S') a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

3.2.2. Mecanismos de desgaste

Desgaste de uma ferramenta de corte é uma perda contínua e microscópica de partículas devido ao uso, o que prejudica a produção, diminui a qualidade final do produto e interfere negativamente no processo de usinagem, diminuindo a vida útil da ferramenta (Santos *et al.*, 2019).

De acordo com Valim (2018), a vida útil da ferramenta é definida como o tempo que a ferramenta trabalha efetivamente, descontados os tempos passivos (período no qual a ferramenta não está efetuando o corte, como, por exemplo: tempo gasto com a substituição de peça a usinar, tempo gasto para realizar movimento de aproximação etc.), até perder a capacidade de corte dentro um critério estabelecido.

Entende-se por desgaste a degradação gradativa da cunha de corte, provocadas por solicitações mecânicas/térmica excessivas; fadiga; e abrasão (Santos *et al.*, 2019)

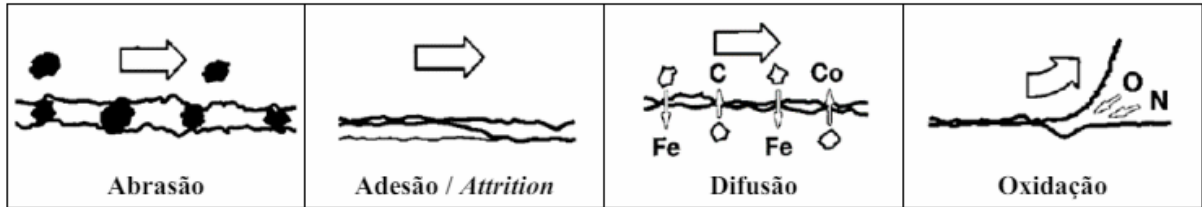
O trabalho mecânico é transformado em deformação plástica nos processos de usinagem, resultando do atrito entre a ferramenta de corte e a peça e aumento da produção de calor (Soori; Arezoo, 2022)

A eficiência da ferramenta está ligada a mecanismos de desgaste que são ativados com o aumento da temperatura na interface entre a aresta de corte e a peça.

Os 4 principais mecanismos de desgaste estão esquematizados na Figura 8 (Rocha Machado, 2015; Stemmer, 2005).

- **Abrasão:** É gerado no atrito entre a ferramenta e a peça usinada, devido a partículas duras no material e pela temperatura de corte, logo quanto maior a dureza, maior o desgaste abrasivo.
- **Adesão:** Ocorre em baixas velocidade de corte e baixas temperaturas as quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta torna-se irregular, tendendo a formação das arestas postiças.
- **Difusão:** Gerado pela temperatura, tempo e solubilidade dos materiais, com a transferência de átomos de um metal para outro, sendo então um fenômeno de nível atômico.
- **Oxidação:** Formado com altas temperaturas e presença de água e ar na extremidade de contato entre ferramenta e cavaco.

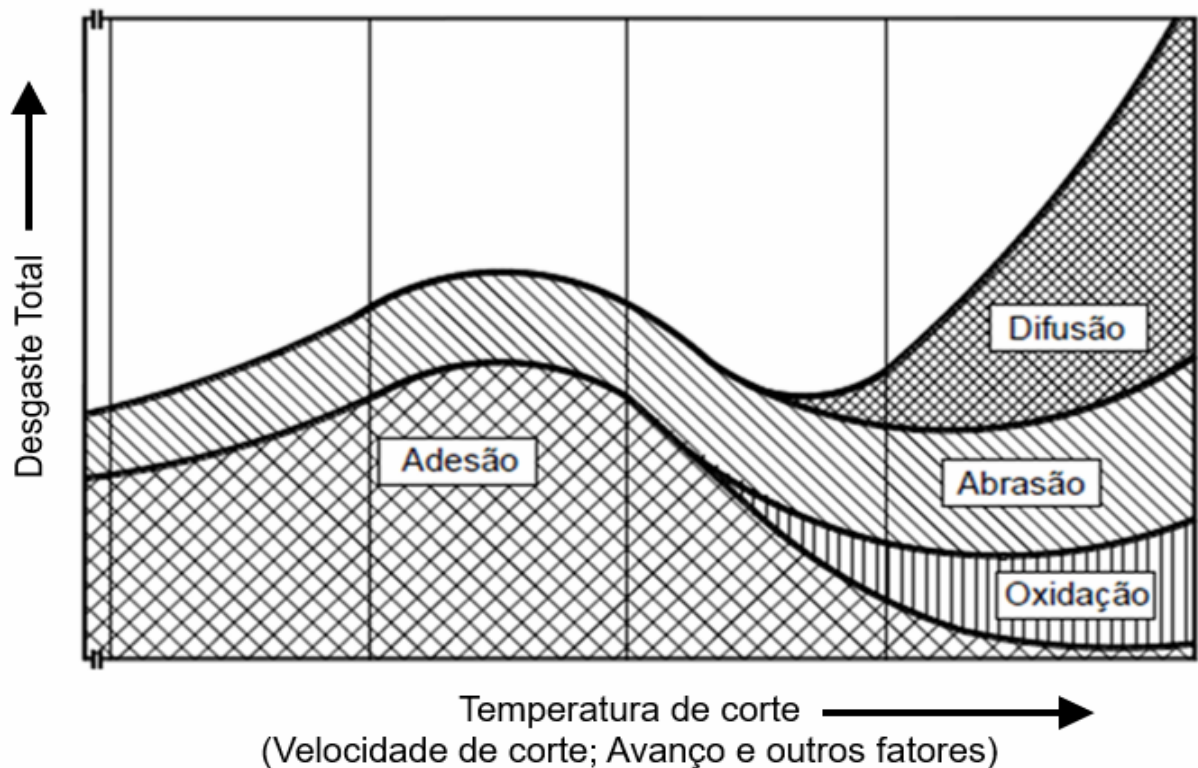
Figura 8 – Representação esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste.



Fonte: Adaptado de (ROSA, 2017)

A Figura 9, representa os mecanismos de desgaste de acordo com a temperatura de corte do material usinado.

Figura 9 – Mecanismos de Desgaste de ferramentas x Temperatura.



Fonte: Adaptado de Rocha Machado (2015).

Representação esquemática dos principais mecanismos de desgaste de ferramentas em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas, o desgaste por adesão é predominante, decorrente da soldagem localizada entre a ferramenta e o cavaco. Em condições intermediárias, destacam-se os desgastes por

abrasão, provocados pelo atrito de partículas duras, e por oxidação, associados à formação e remoção sucessiva de óxidos na superfície da ferramenta. Já em temperaturas elevadas, o mecanismo predominante é o desgaste por difusão, caracterizado pela migração de átomos da ferramenta para o material usinado, reduzindo significativamente sua vida útil.

3.2.3. Comportamento de desgaste

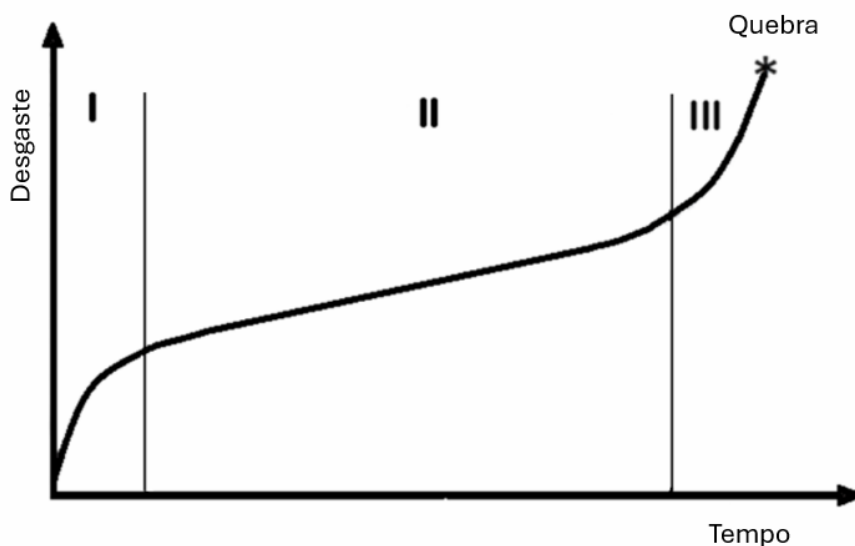
Conforme descrito por Machado *et al.* (2015) e ilustrado na Figura 10, a evolução progressiva do desgaste de uma ferramenta de corte pode ser dividida em três estágios fenomenológicos distintos:

Estágio 1 (Desgaste inicial ou de assentamento): Ocorre no princípio do processo de usinagem e apresenta uma taxa de desgaste elevada. Esse comportamento é atribuído à fase de adequação primária das superfícies de contato dentro do sistema tribológico envolvido;

Estágio 2 (Desgaste em regime permanente): Caracteriza-se por uma taxa de desgaste linear e constante. Nesta fase, o desgaste do gume de corte da ferramenta já se encontra plenamente estabilizado e adaptado às condições do processo e aos mecanismos atuantes, compreendendo a maior parte da sua vida útil;

Estágio 3 (Desgaste acelerado ou catastrófico): Observa-se um aumento abrupto e severo do desgaste em um curto intervalo de tempo. Esse avanço crítico compromete a integridade da ferramenta, culminando em seu colapso iminente.

Figura 10 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte



Fonte: Machado *et al.* (2015).

A análise minuciosa do comportamento de desgaste viabiliza a determinação da vida útil da ferramenta de corte. Para definir o momento ideal de substituição, utilizam-se critérios práticos e normativos, tais como a taxa de desgaste admissível, a qualidade exigida para o acabamento e a precisão dimensional da peça. O rigor no acompanhamento desses parâmetros é imprescindível para assegurar a eficiência e a estabilidade do processo de usinagem.

No contexto industrial, existem diversos métodos convencionais para o controle da vida útil da ferramenta. Destacam-se o tempo total de operação (período em que a ferramenta permanece em uso contínuo), o tempo efetivo de corte (período em que ocorre a remoção real de material) e o volume de produção, quantificado pelo número de peças usinadas. Contudo, Laranjo (2024) ressalta que, embora essas metodologias auxiliem no acompanhamento básico, elas apresentam limitações e não fornecem um controle preciso sobre a vida útil da ferramenta de corte.

Diante da imprecisão dos métodos tradicionais, exige-se uma atenção contínua à evolução dos desgastes ao longo da usinagem. Compreender e avaliar a progressão desse comportamento fornece as informações necessárias para prever o momento exato da troca da ferramenta. Essa intervenção preditiva é estratégica e fundamental para impedir que o desgaste atinja o estágio 3 — caracterizado pelo

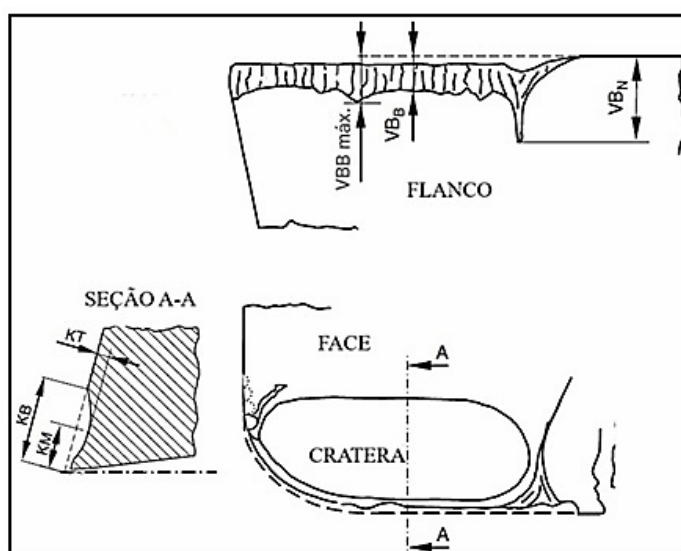
avanço severo e acelerado —, evitando, assim, o colapso estrutural da ferramenta e possíveis danos à peça usinada.

3.2.4. Tipos de desgaste

Com base nos mecanismos padrão, a análise da ferramenta de corte permite identificar o tipo específico de desgaste em ocorrência. A partir dessa constatação, torna-se viável a implementação de melhorias no processo de usinagem visando mitigar ou eliminar tais desgastes, o que eleva a eficiência e prolonga a vida útil da ferramenta.

A quantificação do desgaste pode ser determinada com instrumentos de alta precisão — como lupas, microscópios e perfilômetros —, conforme aponta Ferraresi (2013). Segundo Klocke (2011), as medições seguem as diretrizes da norma DIN ISO 3685, que estabelece a padronização dos métodos de avaliação. A Figura 11 ilustra essas técnicas de medição. Na região do flanco, o desgaste médio é expresso por (VB_B), enquanto o desgaste máximo, representado por ($VB_{m\acute{a}x}$), é o parâmetro que determina o fim da vida útil da ferramenta. O desgaste de entalhe, por sua vez, é caracterizado por (VB_N). Já na face da ferramenta, onde ocorre o desgaste de cratera, avaliam-se especificamente na seção A-A: a profundidade da cratera (KT), a sua largura (KB) e a distância do centro da cratera até o flanco (KM).

Figura 11 - Método de medição de desgaste.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

A Figura 12 apresenta os tipos de desgaste mais comuns que ocorrem nas ferramentas de corte. Fornecendo uma descrição mais detalhada de cada um desses tipos de desgaste, abordando as causas, os mecanismos envolvidos e o impacto no desempenho da ferramenta.

Figura 12 - Desgastes da ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Sandvik (2025).

Os desgastes na figura acima, são descritos como:

- **Desgaste de Flanco:** Segundo a Sandvik (2025), é o tipo de desgaste mais comum nos processos de usinagem, causado principalmente pela abrasão provocada por partículas duras presentes no material da peça. Caracteriza-se pela remoção gradual de material na face de folga da ferramenta. O atrito constante, aliado às altas pressões e temperaturas da zona de corte, intensifica esse desgaste, resultando na perda de precisão dimensional e na deterioração do acabamento da peça usinada.
- **Desgaste de Cratera:** Segundo Machado e colaboradores (2015), apontam que sua causa principal é a interação química entre o material da peça e a ferramenta, sendo severamente agravada por elevadas velocidades de corte. Klocke (2011) complementa que o mecanismo de difusão é determinante nesse processo: sob as altas temperaturas geradas pelo cisalhamento e atrito, os átomos da ferramenta migram para o cavaco, promovendo uma remoção contínua de material.

A evolução dessa cratera enfraquece o gume de corte, tornando-se um fator crítico para a fratura prematura do gume.

- **Desgaste de Entalhe:** De acordo com Machado e colaboradores (2015), manifesta-se como um dano severo e altamente localizado na linha de profundidade de corte máxima, afetando tanto a face de ataque quanto o flanco. Diniz, Marcondes e Coppini (2014) explicam que a ocorrência desse tipo de desgaste está fortemente ligada à resistência superficial do material usinado e às condições tribológicas do processo. Um dos principais mecanismos que levam ao surgimento do entalhe é a oxidação nas regiões próximas à zona de corte sendo agravado pela ação mecânica de atrito e pela adesão intermitente dos cavacos.
- **Deformação Plástica:** Acontece quando as temperaturas e tensões na zona de corte ultrapassam o limite de escoamento térmico do material da pastilha. Conforme a Sandvik (2025), esse problema é mais frequente na utilização de classes de ferramentas com maior tenacidade (mais macias) operando sob condições térmicas extremas, levando ao rebaixamento ou abaulamento da aresta de corte.
- **Ávrias Mecânicas e Térmicas (Lascamento, Quebra e Trincas):** Klocke (2011) descreve que falhas estruturais derivam de esforços mecânicos e térmicos excessivos. Forças de corte extremas podem causar o lascamento ou a quebra do gume, especialmente em ferramentas fabricadas com materiais muito duros e quebradiços, ou quando sujeitas a cortes interrompidos e aprisionamento de cavacos. Além disso, as flutuações cíclicas de temperatura — inerentes aos processos de corte interrompido — geram tensões térmicas alternadas que resultam em trincas térmicas (ou trincas em pente) na ferramenta. Esse fenômeno de fadiga térmica difere das trincas por choque térmico, que ocorrem por variações bruscas e imediatas de temperatura.

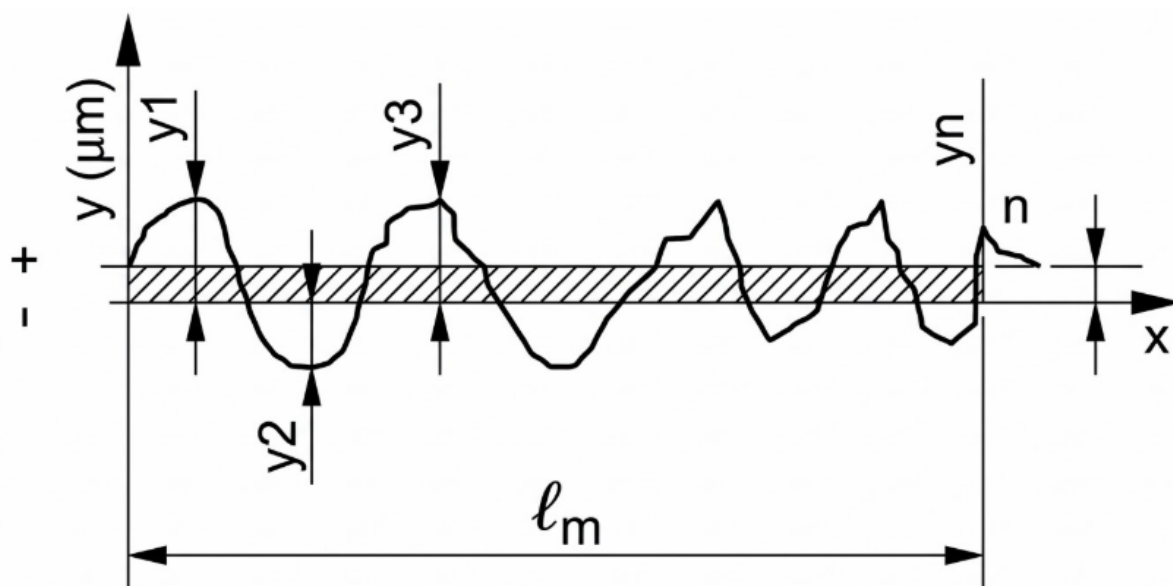
3.3. QUALIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade refere-se aos erros microgeométricos ou irregularidades finas na superfície causados pela interação da microestrutura do material e a ação da ferramenta de corte, sendo inerente ao processo de corte: desgaste da ferramenta, marcas de avanço, vibração (Rocha Machado, 2015).

A rugosidade influencia no comportamento dos componentes mecânicos, podendo alterar algumas características, como: resistência ao desgaste; qualidade de deslizamento; resistência da superfície ao escoamento de fluidos refrigerantes; qualidade de aderência da estrutura quanto as camadas de proteção; resistência à corrosão e, por fim a aparência (Kalpakjian; Schmid, 2020)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma NBR ISO 4287 (2002), descreve que o parâmetro da rugosidade média (R_a) é determinado pela média aritmética dos valores absolutos da ordenada em relação à linha média do comprimento de amostragem (l_m), conforme equação 2. Esse método é utilizado devido à sua simplicidade na medição e é observado na Figura 13.

Figura 13 - Rugosidade média R_a



Fonte: Adaptado de(Almeida, 2008)

(2)

Sendo:

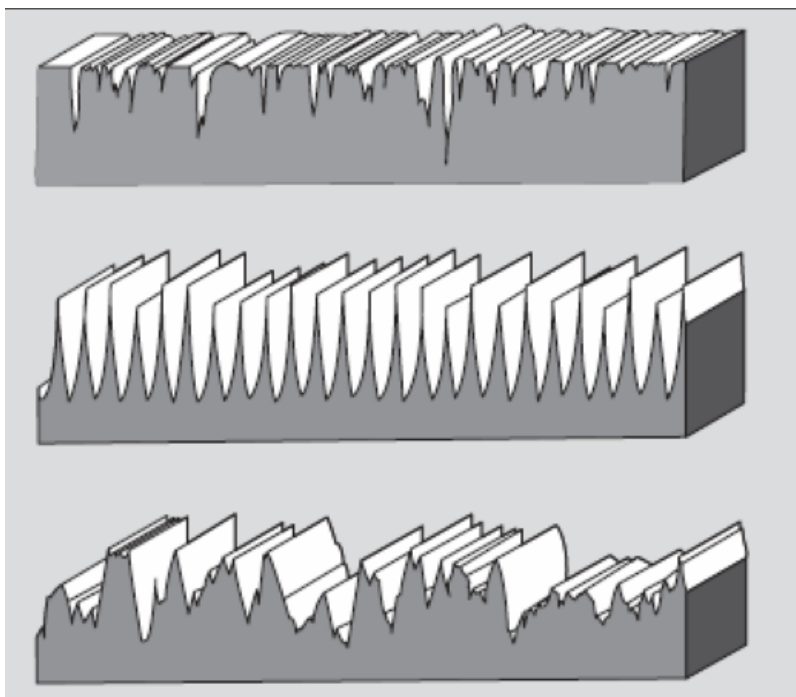
= Rugosidade média;

= altura dos picos e vales fora da linha média;

n = comprimento de amostragem.

O perfil geométrico do acabamento superficial alisado com apenas o padrão Ra não é adequado em situações que demandam a compreensão das alturas máximas de rugosidade. Nesses casos, é recomendável utilizar padrões como a altura total do perfil (R_t) ou altura máxima do perfil (R_z), que são determinados pela soma dos picos e profundidades dos vales no comprimento medido, conforme aconselhado por Machado e colaboradores (2015). As imagens da Figura 14 apresentam alguns perfis geométricos com a mesma variação média de rugosidades (R_a).

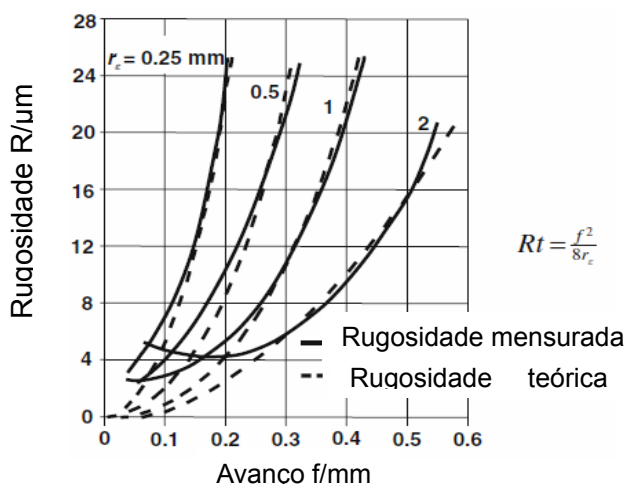
Figura 14 - Perfis geométricos com mesmo valor de Ra



Fonte: Adaptado de Machado e colaboradores (2015).

A rugosidade manifestada na peça resulta da interação dos movimentos relativos entre a peça de trabalho, a ferramenta de corte e o raio de ponta. No processo de torneamento, essa rugosidade é predominantemente influenciada pela taxa de avanço e pela geometria da aresta de corte. A Figura 15 apresenta uma análise comparativa entre os valores teóricos e os valores medidos de rugosidade, mantendo constante o parâmetro de velocidade de corte.

Figura 15 – Comparação da rugosidade mensurada e teórica



Fonte: Adaptado de Klocke e Kuche (2011).

3.4. MÉTODO TAGUCHI

O método Taguchi foi desenvolvido por Genichi Taguchi e seu objetivo principal é assegurar a robustez do processo, a fim de reduzir as perdas através da otimização de parâmetros. Segundo Taguchi, a perda de qualidade pode ser relacionada com a função de perda, conforme mostrado na equação 3. $L(y)$ é definida como a função perda, y é a característica de qualidade em questão, e m é o valor alvo finito (Fogliatto, 1997)

(3)

Uma das principais razões da utilização do método é possibilitar o emprego de inúmeras informações conhecidas sobre o processo, entretanto realizando um número mínimo de experimentos com base nos arranjos ortogonais (Antony *et al.*, 2006)

Além disso, Taguchi desenvolveu uma transformação de dados de resposta, em relação aos ruídos presentes nos estudos, conhecidos como Sinal / Ruído (*Signal / Noise – S/N*). Para Fogliatto (1996), 3 dados descrevem o fenômeno de maneira mais assertivas, sendo destacados abaixo:

- Nominal é melhor, equação 4:

(4)

- Menor é melhor, equação 5:

(5)

- Maior é melhor, equação 6:

(6)

Onde, y , n e i e são o valor da amostra, número de repetições e índice da amostra, respectivamente. Já $(\)$ é dado como a razão entre a média e a variância.

Para implementar o método de Taguchi, deve-se levar em consideração alguns passos, conforme (Montgomery, 2017): determinar os fatores de controle; determinar seus respectivos níveis e determinar o arranjo ortogonal apropriado; conduzir os experimentos e analisar através da contribuição de cada fator (ANOVA), os fatores que minimizam os ruídos (S/N ou ETA) do experimento.

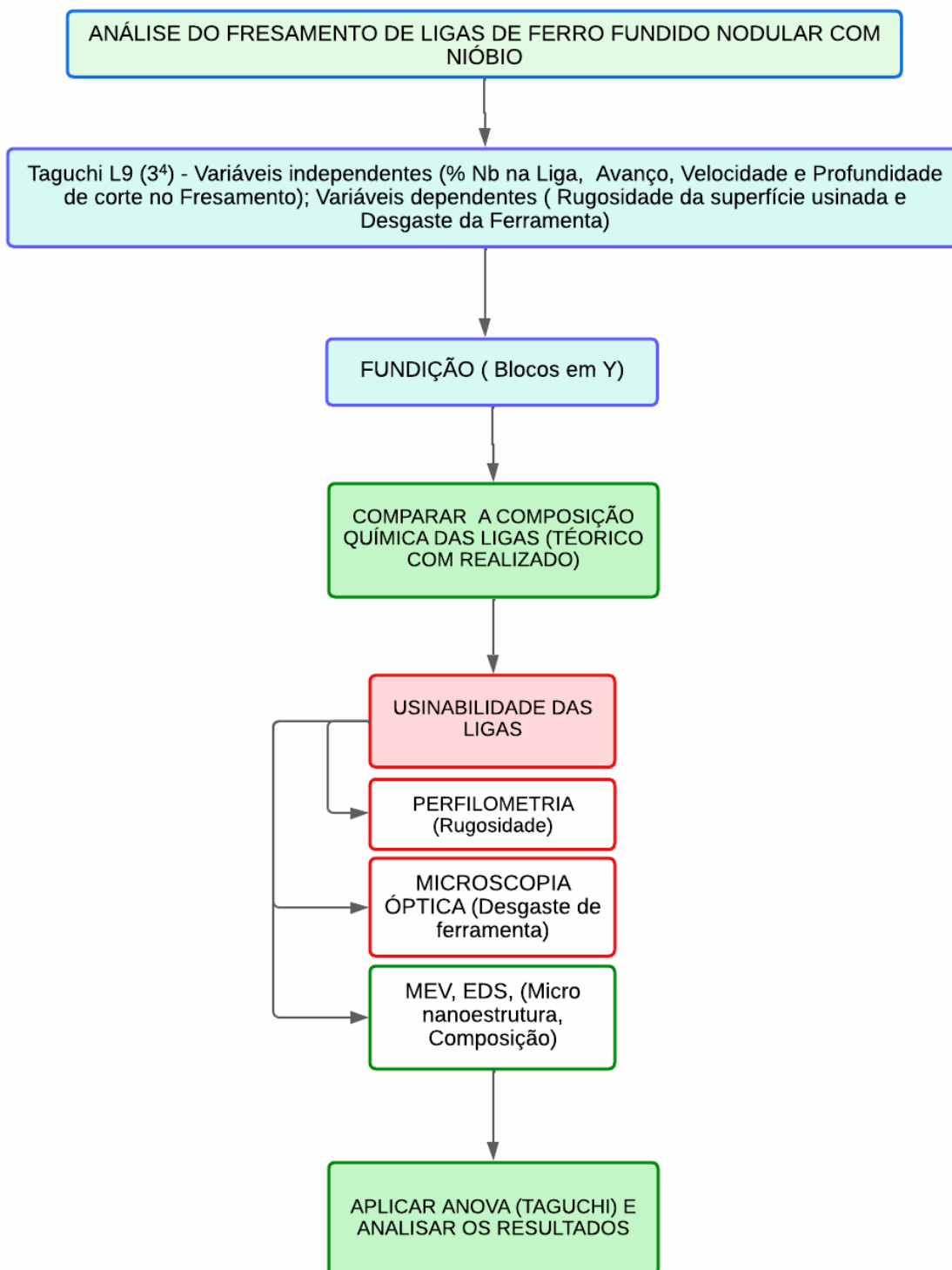
4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo consiste em descrever a metodologia, materiais e equipamentos no estudo, além de como os objetivos gerais e específicos foram atingidos.

4.1. OBJETO DE ESTUDO

O procedimento experimental está embasado na análise do desgaste das ferramentas e rugosidade dos corpos de prova gerados no processo de fresamento da liga de ferro fundido nodular com adição do elemento nióbio. A metodologia adotada pode ser visualizada no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma do processo experimental.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

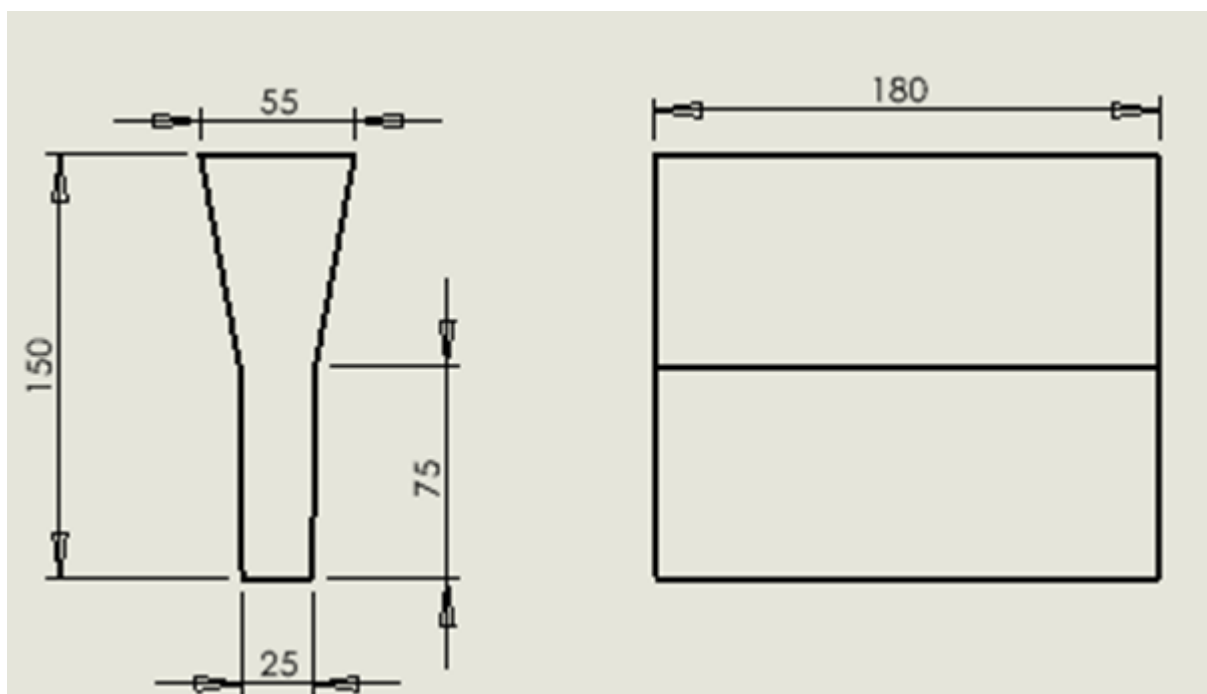
4.2. MATERIAIS

No presente capítulo abordaram-se os materiais e métodos necessários para atingir os objetivos citados anteriormente.

4.2.1. Corpos de prova

Os corpos de prova fundidos com base GGG50 seguiram a norma ASTM A897/06 com as dimensões e geometrias em milímetros dos blocos Y, definidas conforme a Figura 17.

Figura 17 - Dimensão do bloco Y.



Fonte: Adaptado da norma ASTM A897/06

4.2.2. Preparação dos corpos de prova

O processo de corte do bloco Y foi realizado deixando somente a seção útil de 75 mm para utilização nos ensaios de usinagem, enquanto a porção remanescente acima dessa medida atuou como alimentador, também denominado massalote. Essa configuração foi especificamente adotada com o objetivo de evitar

defeitos decorrentes da contração do material durante o resfriamento, os quais poderiam comprometer os resultados dos ensaios mecânicos subsequentes.

Com relação a composição química teórica dos mesmos ou seja, valores nominais estabelecidos antes da fusão, adotou-se o percentual em peso do elemento Nióbio como variável de estudo, mantendo o restante da composição sem variações, possuindo os elementos característicos dos ferros fundidos nodulares, tais como ferro, silício e magnésio (FeSiMg), como agente nodularizante, além de cobre e manganês como agentes perlitizantes, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química da liga de FN com Nióbio.

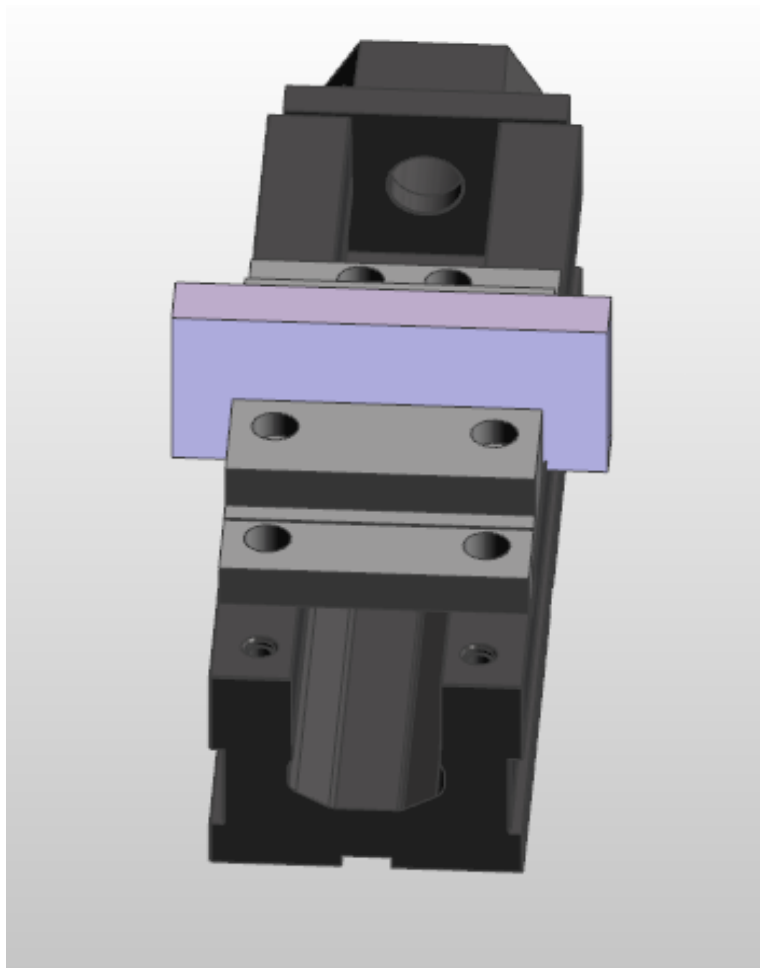
Amostra	C (%)	Si%	Mn%	P%	S%	Sn %	Mg %	Cu %	Ni%	Cr%	Mo %	Nb %	Fe %
0,20% Nb	3.45	2.35	0.325	0.04	0.01 25	0.01	0.03 7	0.35	0.1	0.05	0.025	0.20	*
0,25% Nb	3.45	2.35	0.325	0.04	0.01 25	0.01	0.03 7	0.35	0.1	0.05	0.025	0.25	*
0,30% Nb	3.45	2.35	0.325	0.04	0.01 25	0.01	0.03 7	0.35	0.1	0.05	0.025	0.30	*

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025). *(percentual restante).

4.2.3. Dispositivo de fixação

Para a fixação dos corpos de prova, adotou-se o uso de fixação mecânica por meio de uma morsa no centro de usinagem vertical, para garantir a fixação da peça, conforme modelagem em CAD/CAM na Figura 18.

Figura 18 – Adaptação de morsa no centro de usinagem, modelagem em CAD/CAM



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Fixou-se a morsa na mesa de trabalho do centro de usinagem, utilizando 2 parafusos M14. Além disso, a fim de garantir a mesma posição dos corpos de prova, utilizou-se a lateral da morsa como referência para posicionamento dos mesmos, conforme Figura 19.

Figura 19 – Adaptação de morsa no centro de usinagem



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

4.2.4. Ferramenta de usinagem

A ferramenta utilizada nos experimentos foi uma fresa intercambiável do fornecedor “Iscar”, cujo modelo é o HM90 E90AD-M-16-JHP. Ela possuiu 3 insertos por cabeçote com o diâmetro nominal de 32 mm, conforme Figura 20.

Figura 20 – Cabeçote de fresa Ø32mm



Fonte: Adaptado de (Iscar do Brasil, 2025).

A ferramenta foi fixada em um cone BT40 através da rosca M16 que compõe sua estrutura, ficando com comprimento de 131,32 mm para fora do fuso (*preset*) além de batimento radial de 0,03 mm, sendo ambos os valores encontrados por meio do *presseter Zoller Smile 2*, garantindo boa estabilidade e rigidez para validação dos posteriores testes de fresamento, conforme Figura 21.

Figura 21 – Ferramenta de usinagem utilizada no fresamento



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

O inserto utilizado foi o ADKT 1505PDR-HM, com raio de ponta de 0,8 mm e classe de cobertura IC910 que traz uma proteção em PVD e camada de AlTiN, abrangendo as classes P15 - P30 e K15 – K35. A geometria da ferramenta em questão possui um ângulo de ataque de 18°, ângulo de folga de 15° e um ângulo de posição (KAPR) de 90°, indicado para o processo de faceamento de faces planas, logo objeto de estudo subsequente no respectivo trabalho.

4.2.5. Centro de usinagem

A máquina utilizada foi um centro de usinagem vertical de fresamento, modelo DOOSAN DNM6700. O centro possui cursos de usinagem de 1300mm em X, 670 mm em Y e 625 mm. Possui velocidade do fuso máxima de 8000 RPM, potência do motor do fuso de 15 kW, além de capacidade de até 30 ferramentas no magazine, conforme Figura 22.

Figura 22 – Centro de usinagem DOOSAN DNM6700



Fonte: Acervo RIO (2024).

4.3. MÉTODOS

O planejamento experimental seguiu o método de Taguchi, sendo utilizado a matriz ortogonal L9 (3^4), analisando os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte (V_c), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p). Portanto, além do elemento nióbio, as variáveis de entrada com os respectivos níveis foram dispostas na tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis de análise e seus níveis

Símbolo	Variáveis	Unidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Nb	Nióbio	%	0,2	0,25	0,3
Vc	Velocidade de corte	m/min	200	250	300
fz	Avanço por dente	mm/z	0,1	0,15	0,2
ap	Profundidade de corte	mm	0,5	1	1,5

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025). (*parâmetro do fornecedor, demais definidos via *know-how* da RIO).

Para a usinagem dos corpos de prova utilizou-se do sentido de corte concordante e largura de corte (*ae*) de 80% da ferramenta.

Os parâmetros foram determinados a partir de dados do fornecedor do inserto de análise (Iscar do Brasil) e dos utilizados atualmente nos processos de usinagem da RIO, para Ferro fundido cinzento (FC), Ferro fundido Nodular (FN) e Aço fundido, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de usinagem utilizados nos processos da RIO (Know-How).

PROCESSO	LIGAS					
	Vc (m/min)			fz (mm/rot) /(mm/z)		
	FC	FN	AÇO	FC	FN	AÇO
FRESAMENTO (FACEAMENTO)	350	350	200-280	0,12-0,18	0,12-0,18	0,15-0,18-0,2

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025). (*parâmetros utilizados no processo da RIO).

Com os dados definidos, determinou-se o arranjo da matriz ortogonal, tabela 4, cuja variáveis de resposta foram a rugosidade e o desgaste da ferramenta. Sendo assim, utilizou-se no experimento o critério da função perda “Menor é melhor” para a aproximação e obtenção dos resultados.

Tabela 4 - Arranjo da matriz ortogonal de Taguchi.

S. N	Nióbio (%)	Avanço por dente fz (mm/dente)	Velocidade de corte (m/min)	Profundidade de corte ap (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Para efetuar a análise estatística dos ensaios, foi executado a medição tanto de desgaste de ferramenta quanto da rugosidade, no comprimento usinado total de 9 metros. Para tal, adicionou-se um intervalo de medição de 1,3,5,7 e 9 metros, logo gerando-se um total de 90 resultados.

4.4. ENSAIOS E ANÁLISES

Todos os materiais provenientes da fase subsequente passaram por procedimentos de preparação necessários para a condução dos ensaios e todas as etapas de preparação foram conduzidas conforme as normas técnicas vigentes, permitindo garantir a consistência e confiabilidade dos resultados dos ensaios a serem realizados.

4.4.1. Análise química das ligas fundidas

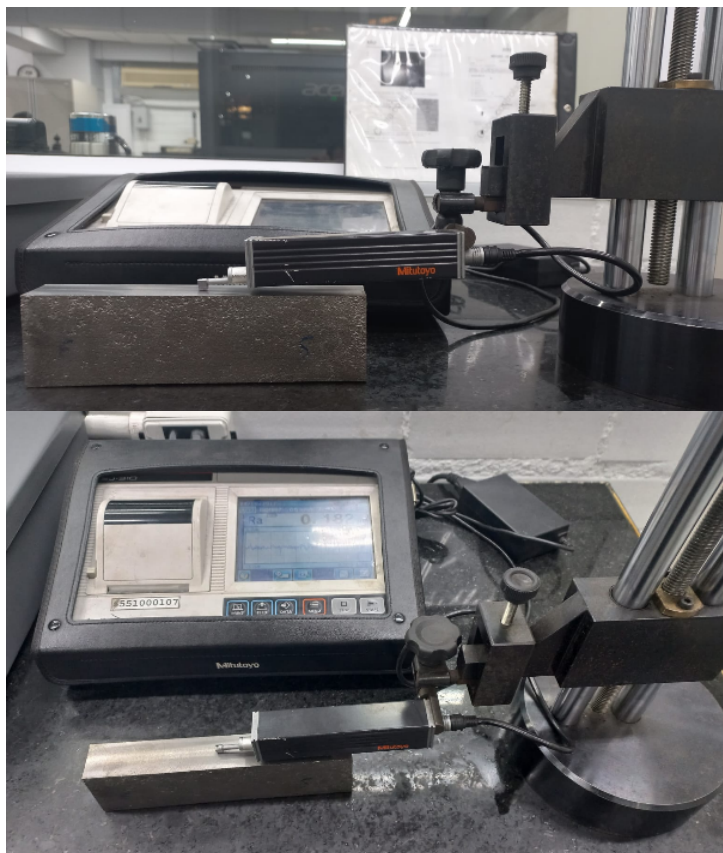
A análise química das ligas fundidas foi realizada com um espectrômetro da marca AMETEK, modelo SPECTROMAX, disponível na empresa Rio para a avaliação da qualidade do material. Para efetuar a análise química, o material foi preparado através de uma retífica plana de perfil, em formato de moedas, disponível na empresa Rio.

4.4.2. Análise de rugosidade superficial

Para a análise de rugosidade superficial das amostras utilizou-se de um rugosímetro portátil modelo SJ-310 da Mitutoyo, com resoluções de 0,01 μm , juntamente com um apalpador mecânico com diamante de 5 μm na ponta, presente na Rio Riosulense, conforme Figura 23.

Figura 23 – Rugosímetro portátil modelo SJ-310

APALPADOR



Fonte: Acervo RIO (2024)

O método utilizado nos testes compreende a usinagem da face, no qual adotou-se como parâmetros de rugosidade valores de rugosidade média (R_a) e altura máxima do perfil (R_z), adotando um critério de *cut-off* de 0,8 mm x 5, com três medições realizadas em cada zona usinada, no sentido de corte da ferramenta.

4.4.3. Análise de desgaste de ferramenta

Para verificar os tipos de desgastes encontrados na usinagem, foram separados os insertos utilizados, sendo os mesmos limpos com acetona e álcool isopropílico com o intuito de avaliar através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca *Tescan Orsay Holding* e modelo Mira 3 LMU, localizado no LCMIC-UCS. O MEV é equipado com sonda tipo EDS (*Energy dispersive spectroscopy*) da marca *Oxford Instruments Company* modelo XMax-50, o equipamento pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Microscópio MEV



Fonte: Acervo UCS (2025)

Para medir o desgaste máximo ($VB_{\text{máx}}$) sofridos pela ferramenta, utilizou-se um microscópio óptico DinoLite modelo AM7515MZT com resolução de 5 megapixels, conforme Figura 25.

Figura 25 – Microscópio óptico Dino

CÂMERA MICROSCÓPICA

IMAGEM AMPLIADA

FERRAMENTA
DE ANÁLISE



Fonte: Acervo RIO (2024)

As imagens geradas foram extraídas tanto do gume de corte principal, quanto do secundário, onde traçaram-se linhas paralelas ao flanco principal e abaixo da marca de desgaste de flanco, além de uma linha perpendicular as duas linhas, verificando assim a distância entre as duas retas, sendo avaliadas de acordo com o aumento do comprimento usinado em 1,3,5,7, e 9 metros.

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar os a correlação do desgaste e rugosidade dos corpos de prova, utilizou-se o método de Taguchi (L9) com uma réplica, junto com a matriz de correlação de Pearson. Para tal, adotou-se o critério menor é melhor assim, valores superiores de S/N denotam melhor desempenho do processo, isto é, menor variabilidade, indicando maior estabilidade e qualidade na resposta.

5. RESULTADOS

No presente capítulo, apresentam-se uma análise dos resultados obtidos dos experimentos descritos.

5.1. ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL FUNDIDO

A tabela 5 apresenta os resultados da composição química obtida por meio de espectrometria óptica nos testes realizados. Os valores inicialmente planejados de Nb eram de 0,2 %, 0,25 % e 0,3 %, porém na prática os teores tiveram pequena variação, o que é normal para o processo de fundição, pois se trabalha com valor mínimo e máximo. Variações no teor de nióbio podem ter origem por contaminação de material retido na parede do forno. Para determinação do carbono equivalente (CE) foi utilizada a equação 7.

..... (7)

Tabela 5 – Composição química

	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Cu	% P	% S	% Sn	% Mg	% Nb	% Al	% Ce	% Fe
1	3,49	2,64	0,31	0,036	0,31	0,049	0,015	0,001	0,046	0,18	0,03	4,39	Restante
2	3,57	2,61	0,32	0,045	0,34	0,04	0,015	0,002	0,045	0,25	0,022	4,45	Restante
3	3,73	2,38	0,35	0,107	0,32	0,049	0,012	0,012	0,05	0,347	0,11	4,54	Restante

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

5.2. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FERRAMENTA

Os dados obtidos nos experimentos estão em sua versão completa dispostos no Apêndice A, com valores encontrados tanto de rugosidade média (R_a), quanto de desgaste de flanco máximo ($VB_{máx}$). A fim de validar os testes desenvolvidos, executou-se o método de Taguchi de forma individualizada nas medições de 1, 3, 5, 7 e 9 metros usinados, tendo como variável independente os 4 fatores apresentados anteriormente, mas tratando as variáveis dependentes Rugosidade e Desgaste de ferramenta, de forma individualizada.

Além de Taguchi, utilizou-se a matriz de correlação de Pearson, para verificar a significância do Sinal / Ruído em cada distância usinada. Os dados estão dispostos no Apêndice B.

5.3. ANÁLISE DE RUGOSIDADE

Com o intuito de analisar a evolução da rugosidade média (Ra) em relação ao comprimento em metros usinados, gerou-se os gráficos individuais de cada teste e suas respectivas médias, observável na Figura 26, onde a) é referente ao Teste 1 e respectivamente b) Teste 2, c) Teste 3, d) Teste 4, e) Teste 5, f) Teste 6, g) Teste 7, h) Teste 8 e i) Teste 9.

Figura 26 – Análise de rugosidade média (Ra) x comprimento usinado dos testes: a) é referente ao Teste 1, b) Teste 2, c) Teste 3, d) Teste 4, e) Teste 5, f) Teste 6, g) Teste 7, h) Teste 8 e i) Teste 9.

a)

b)

d)

e)

g)

h)

Os resultados da Figura 26 evidenciam que o teste 4 apresentou o melhor desempenho geral na manutenção da qualidade superficial ao longo de toda a operação, mantendo valores de rugosidade abaixo de $1,5 \mu\text{m}$ e mantendo-se constante em $1,0 \mu\text{m}$ durante os 9 metros usinados, com variação total de apenas $0,6 \mu\text{m}$. Esse teste corresponde à combinação de 0,25% de nióbio, avanço de $0,10 \text{ mm/dente}$, velocidade de corte de 250 m/min e profundidade de $1,5 \text{ mm}$. Os testes 1, 5 e 7 também apresentaram desempenho aceitável, com rugosidades finais variando entre $1,0$ e $1,5 \mu\text{m}$ e manutenção razoável da estabilidade ao longo da operação. Em contraste, os Testes 3, 6 e 9 demonstraram valores com maiores oscilações, sendo que todos utilizam a variável avanço com o nível máximo de $0,2 \text{ mm/z}$, logo tendendo a degradação acelerada da ferramenta durante o processo.

A importância da seleção adequada do teor de nióbio foi reforçada pelos resultados experimentais, já que o teste 5 (0,25% Nb) superou os testes 8 e 9, que incorporaram 0,30% de Nb.

Além disso analisou-se a evolução da altura máxima do perfil (R_z) em relação ao comprimento em metros usinados, obtendo-se os gráficos individuais de cada teste e suas respectivas médias, observável na Figura 27, onde a) é referente ao Teste 1 e respectivamente b) Teste 2, c) Teste 3, d) Teste 4, e) Teste 5, f) Teste 6, g) Teste 7, h) Teste 8 e i) Teste 9.

Figura 27 – Análise de rugosidade (R_z) x comprimento usinado dos testes: a) é referente ao Teste 1 e respectivamente b) Teste 2 , c) Teste 3, d)Teste 4, e)Teste 5, f)Teste 6, g)Teste 7, h) Teste 8 e i)Teste 9.

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

Os resultados da Figura 27 evidenciam que o teste 4 novamente apresentou o melhor desempenho geral na manutenção da qualidade superficial ao longo de toda a operação, assim como na Figura 26, mantendo valores na faixa de 8 μm . Os testes 1, 5 e 7 também apresentaram desempenho aceitável, similar ao encontrado na medição de rugosidade média.

5.4. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE RUGOSIDADE

Aplicando o método de Taguchi com a rugosidade como variável dependente, determinaram-se os seguintes resultados, dispostos na tabela 6.

Tabela 6 – ANOVA de Taguchi com a variável Rugosidade

ANOVA de Taguchi por comprimento usinado: Rugosidade (Ra)					
1 metro					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	13,32297	2	6,66149	21,94623	0,000346
Fz	58,54720	2	29,27360	96,44173	0,000001
Vc	12,69954	2	6,34977	20,91929	0,000413
Ap	0,99350	2	0,49675	1,63654	0,247629
Resíduo	2,73183	9	0,30354	-	-
3 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	0,98398	2	0,49199	3,7235	0,066330
Fz	73,91248	2	36,95624	279,6911	0,000000
Vc	23,49664	2	11,74832	88,9133	0,000001
Ap	20,97379	2	10,48689	79,3666	0,000002
Resíduo	1,18919	9	0,13213	-	-
5 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	21,0742	2	10,53710	125,3581	0,000000
Fz	131,7768	2	65,88840	783,8636	0,000000
Vc	4,7320	2	2,36600	28,1479	0,000134
Ap	6,7826	2	3,39130	40,3457	0,000032
Resíduo	0,7565	9	0,08406	-	-
7 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	4,54290	2	2,27145	15,98344	0,001092
Fz	141,90830	2	70,95413	499,28060	0,000000
Vc	0,73250	2	0,36625	2,57718	0,130343
Ap	2,13933	2	1,06967	7,52688	0,011989
Resíduo	1,27902	9	0,14211	-	-

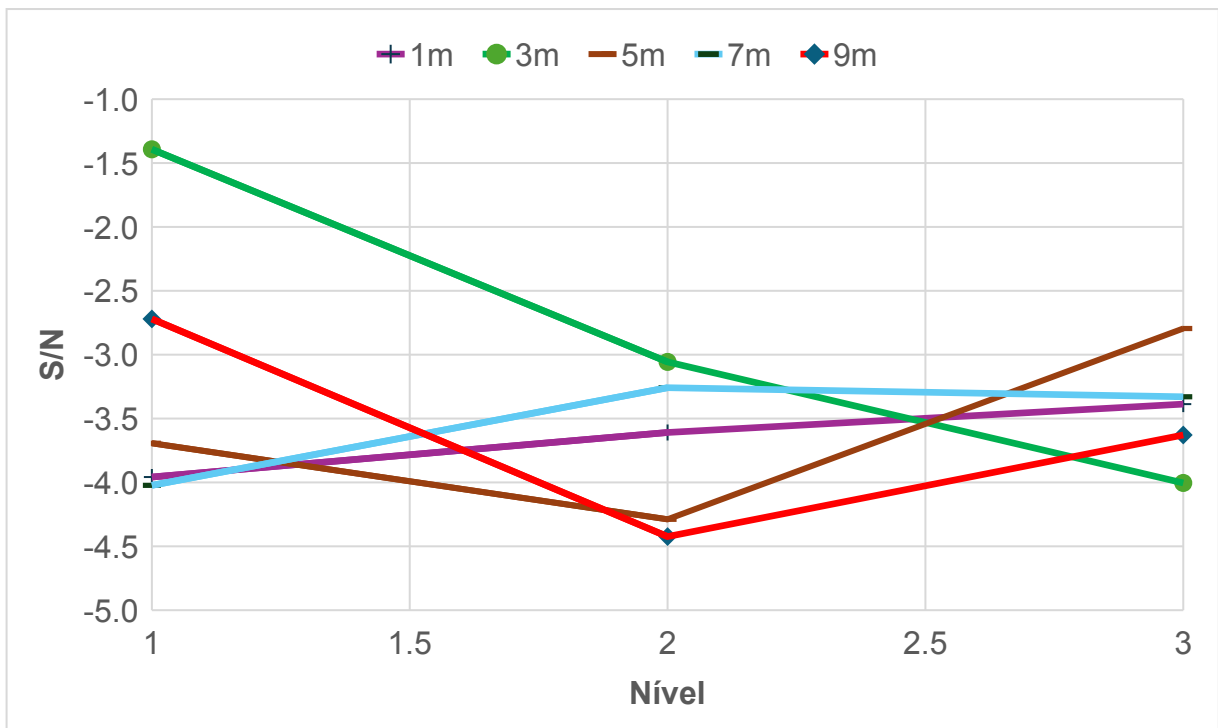
	9 metros				
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	7,93504	2	3,96752	59,22553	0,000007
Fz	59,15770	2	29,57885	441,54100	0,000000
Vc	12,43762	2	6,21881	92,83182	0,000001
Ap	8,72079	2	4,36040	65,09019	0,000004
Resíduo	0,60291	9	0,06699	-	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Onde estão presentes a soma quadrática (SS), graus de liberdade (df), média quadrática (MS), F-valor (valor do teste de hipótese de Fischer) e p-valor (indicando a probabilidade).

Na Figura 28 é possível observar a análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x profundidade de corte nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros. Neste caso, valores superiores de S/N denotam melhor desempenho do processo, isto é, menor variabilidade e menor rugosidade sob as mesmas condições de corte, indicando maior estabilidade e qualidade na resposta. Desta forma, pode-se verificar que à medida que a distância de corte aumenta (de 1m para 9m), não é verificado nenhuma tendência clara, já que há inversões do sinal S/N.

Figura 28 - Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x profundidade de corte: 1 até 9 metros

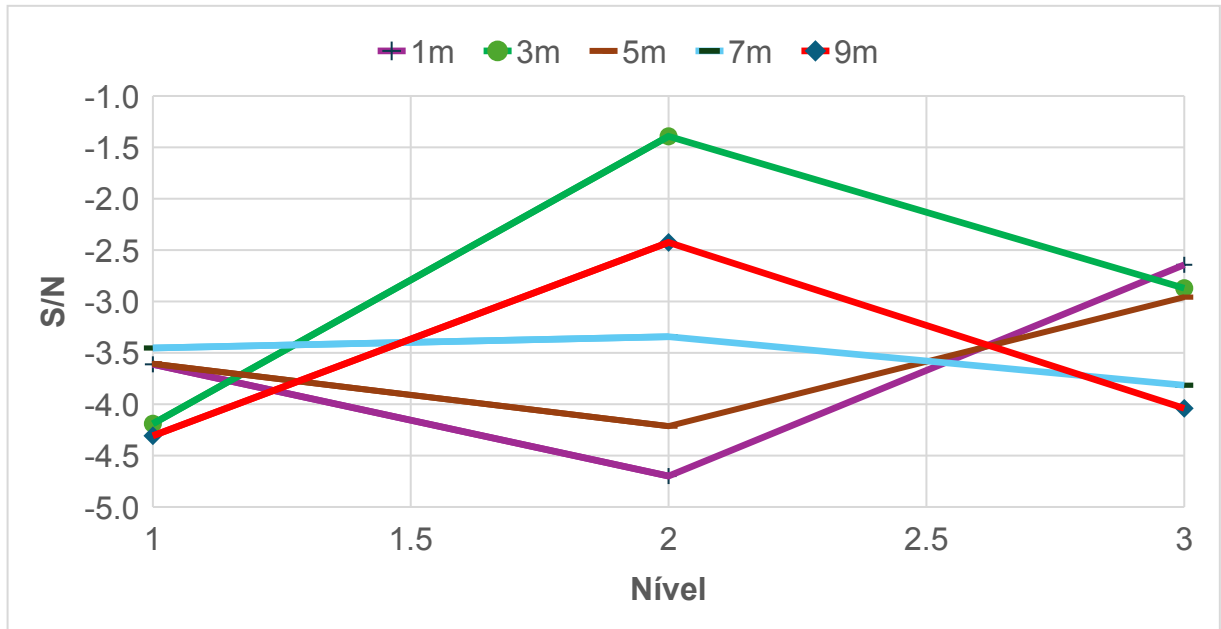


Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

A profundidade de corte apresenta efeito secundário e geralmente de baixa correlação com a rugosidade superficial ao longo dos comprimentos analisados (Lu *et al.*, 2020). As análises estatísticas revelam indeterminação de significância em todos os comprimentos. Este comportamento indica que, diferentemente do avanço (visto posteriormente), a profundidade não exerce efeito previsível sobre o acabamento superficial no ferro fundido nodular. Segundo Melo e colaboradores (2013), percebe-se um efeito contrário, onde a rugosidade foi afetada diretamente pela profundidade de corte, possuindo maior relevância em 0,5mm (Melo; Ten Caten; Sant'Anna, 2013).

Contudo, a falta de significância estatística ($p > 0,05$ em todos os estágios) impede conclusões definitivas. A análise ANOVA confirma ausência de diferenças significativas entre os três níveis testados (0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm), reforçando que a profundidade pode ser ajustada primariamente em função de produtividade e não de acabamento superficial. Da mesma forma que na Figura 22, verifica-se há indeterminação na análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x velocidade de corte nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros, conforme Figura 29. À medida que a distância de corte aumenta (de 1 m para 9 m), não é verificado nenhuma tendência clara, já que há inversões do sinal S/N.

Figura 29- Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x velocidade de corte: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

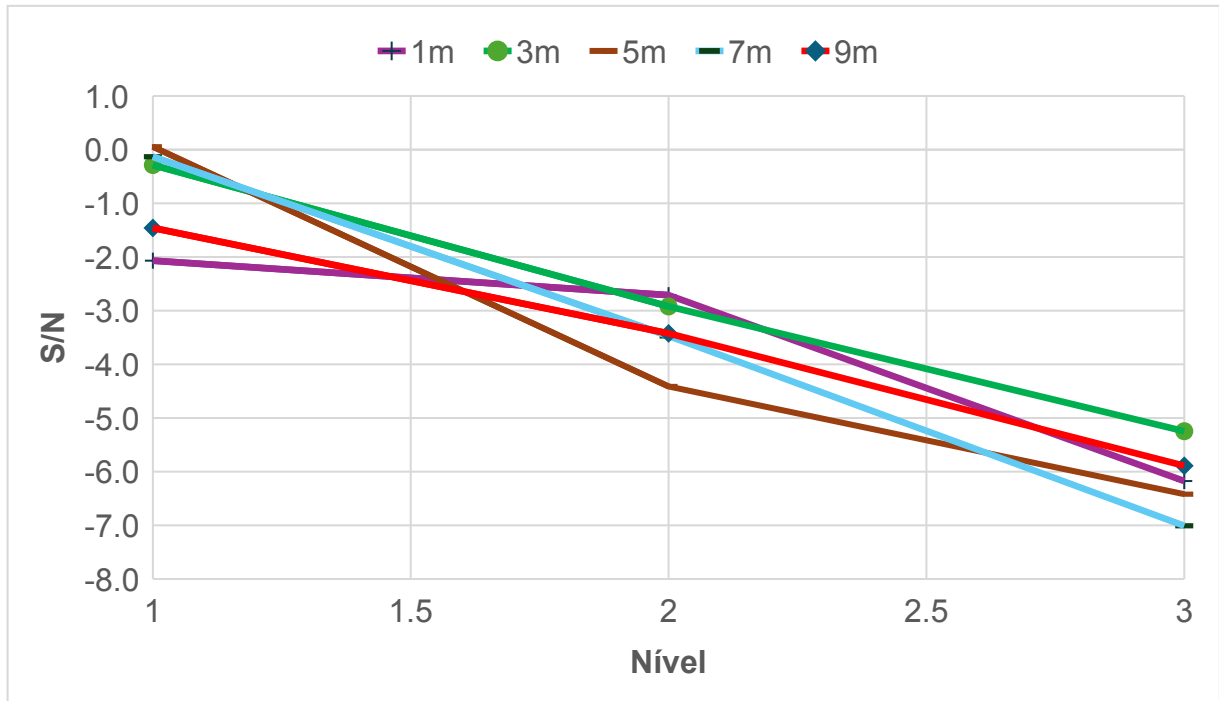
A velocidade de corte exibe uma tendência a melhor condição com 250m/min, entretanto observa-se uma inversão entre as curvas indicadas pelo aumento do comprimento usinado, junto com a falta de significância estatística ($p > 0,05$ em todos os estágios), conforme apêndice B. Conforme Xavier e colaboradores (2022) verifica-se que em usinagem de ferro fundido nodular, velocidades intermediárias (200-300 m/min) permitem manutenção estável do acabamento.

A análise ANOVA confirma que as diferenças entre os três níveis de velocidade testados (200, 250, 300 m/min) não são estatisticamente significativas para rugosidade em nenhum dos cinco estágios. Com isso, percebe-se que, dentro da faixa operacional testada, a velocidade pode ser ajustada em função de outros critérios (vida de ferramenta, produtividade, temperatura de corte) sem comprometer o acabamento sendo este fenômeno confirmado por Silva e colaboradores (2021), que destacam que a presença dos carbonetos de nióbio altera o comportamento térmico e o mecanismo de corte.

Diferentemente das variáveis: profundidade de corte, velocidade de corte e até do percentual de nióbio, visto posteriormente, confirmou-se que a variável avanço de corte possui relevância, apresentado na Figura 30 onde analisou-se a função sinal / ruído da variável rugosidade x avanço de corte nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros. Desta forma, pode-se verificar que à medida que a distância de

corte aumenta (de 1 m para 9 m), existe uma tendência das funções sinal-ruído, mantendo-se constantes mediante os comprimentos usinados.

Figura 30- Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade x avanço de corte: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

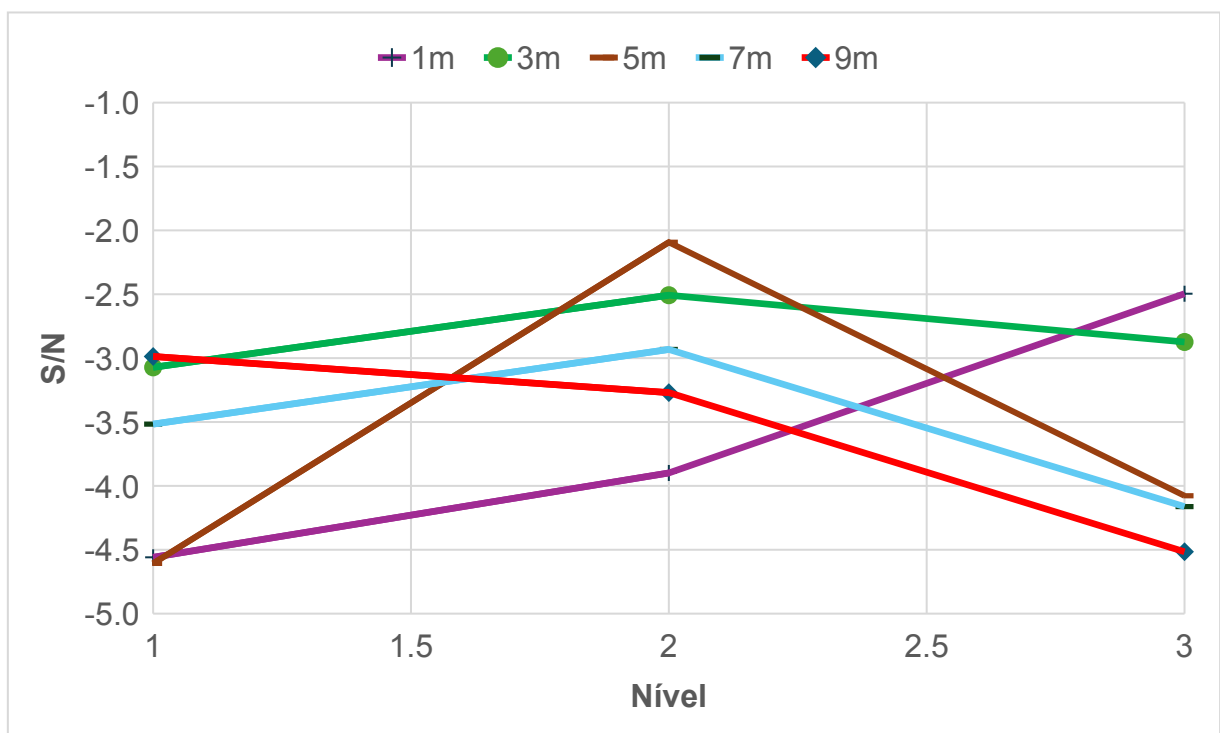
O avanço de corte é, comprovadamente, o fator mais determinante para a rugosidade no fresamento do ferro fundido nodular com adição de nióbio, tanto analisando na análise individual de Pearson, quanto da análise de S/N na tabela 6, assim como em estudos de (Lu *et al.*, 2020; Reis, 2021). A análise estatística através da matriz de Pearson, revela correlações altas em três estágios críticos: 3 metros ($r = -0,9994$; $p = 0,0229$; $R^2 = 0,9987$), 7 metros ($r = -0,9999$; $p = 0,0106$; $R^2 = 0,9997$) e 9 metros ($r = -0,9979$; $p = 0,0415$; $R^2 = 0,9958$). Este padrão indica que mais de 99% das variações observadas em rugosidade podem ser atribuídas ao avanço, confirmando a literatura clássica de usinagem que relaciona maior avanço a incremento no espaçamento entre marcas deixadas pela ferramenta, piorando o acabamento (Rocha Machado, 2015).

Outro ponto de avaliação evidencia que no menor nível (0,1 mm/z) a função sinal-ruído apresenta os maiores valores, logo corroborando com a literatura sobre usinagem de ferro fundido e otimização com Taguchi (Raut; Bahekar, 2020)

onde o avanço exerce efeito dominante sobre rugosidade em ferros fundidos, especialmente no menor nível adotado.

Por fim, na Figura 31 é possível observar a análise da função sinal / ruído da variável rugosidade α (%) nióbio nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros. Neste caso, valores superiores de S/N denotam melhor desempenho do processo, isto é, menor variabilidade e menor rugosidade sob as mesmas condições de corte, indicando maior estabilidade e qualidade na resposta. Desta forma, pode-se verificar que à medida que a distância de corte aumenta (de 1 m para 9 m), a função sinal S/N tende a diminuir, provavelmente devido o próprio desgaste da ferramenta, ficando evidenciado no nível 2.

Figura 31 - Análise da função sinal / ruído da variável rugosidade α nióbio: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

De forma geral, não é determinada significância no percentual do teor de nióbio em relação a rugosidade das peças fresadas. Mesmo assim, no nível 2, com 0,25% de Nb, encontrou-se a maioria dos valores de S/N relevantes, sendo maiores entre os três níveis. Em um estudo de Reis e colaboradores (2021), demonstrou-se que a presença de carbonetos NbC dispersos na matriz atua positivamente com o aumento da microdureza da matriz junto com fatores como o refinamento da grafita

e da perlita, promovendo um corte mais estável e reduzindo a geração de descontinuidades, resultando em melhores valores de rugosidade.

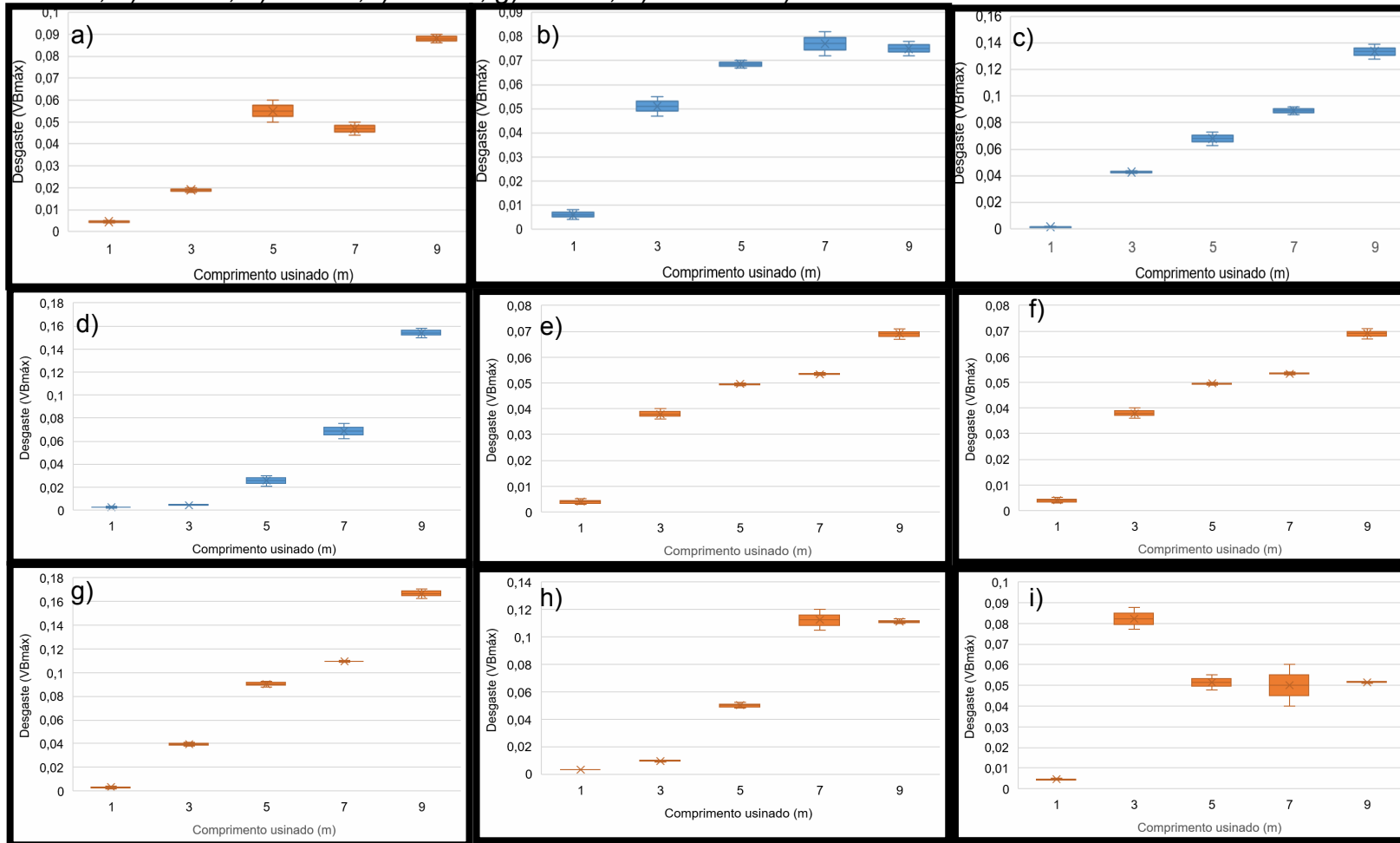
Segundo Ahmed e colaboradores. (2021), em ferro nodular, a adição de nióbio até 0,10% promove refinamento da grafita e da perlita, com formação de carbonetos NbC primários, aumentando a dureza da matriz. Embora isso possa teoricamente reduzir a usinabilidade em materiais de maior dureza, o refinamento microestrutural pode favorecer melhor acabamento.

Segundo Souza e colaboradores (2014), em ferro nodular com adições de Nb entre 0,23% e 0,85%, teores acima de 0,23% promovem aumentos progressivos de dureza e resistência, mas reduzem significativamente a ductilidade e a tenacidade ao impacto Charpy, devido ao aumento da fração de perlita e precipitação de carbonetos de NbC. O estudo identifica 0,23% Nb como a faixa ótima para equilíbrio entre propriedades mecânicas e usinabilidade. Dessa forma, demonstra-se através de estudos prévios que teores próximos a 0,2% de Nb, favorecem a diminuição de rugosidade, assim como apresentado por onde ele foi o segundo fator mais influente no acabamento (Reis, 2021).

5.5. ANÁLISE DE DESGASTE

A Figura 32 apresenta a evolução do desgaste de flanco máximo ($VB_{m\acute{a}x}$) para os nove ensaios experimentais da matriz ortogonal de Taguchi (L9), ao longo de comprimentos usinados de 1, 3, 5, 7 e 9 metros, onde a) é referente ao Teste 1 e respectivamente b) Teste 2, c) Teste 3, d) Teste 4, e) Teste 5, f) Teste 6, g) Teste 7, h) Teste 8 e i) Teste 9. Observa-se comportamento heterogêneo entre os diferentes conjuntos de parâmetros, com destaque para o teste 3, teste 4 e teste 7, que apresentaram valores de $VB_{m\acute{a}x}$ superiores a 0,12 mm aos 9 metros usinados, indicando desgaste moderado de acordo com o critério de fim de vida da ferramenta ($VB_{m\acute{a}x} \geq 0,3$ mm segundo norma ISO 3685:2017 (ABNT, 2017)).

Figura 32 – Análise de desgaste x comprimento usinado dos testes: a) é referente ao Teste 1 e respectivamente b) Teste 2 , c) Teste 3, d) Teste 4, e) Teste 5, f) Teste 6, g) Teste 7, h) Teste 8 e i) Teste 9.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025)

Teste 3 ($Nb = 0,18\%$, $fz = 0,20$ mm/z, $Vc = 300$ m/min, $ap = 1,5$ mm): Desgaste acelerado a partir de 5 metros, atingindo $VB_{m\acute{a}x} \approx 0,139$ mm aos 9m. A combinação do nível mais alto de velocidade de corte (300 m/min) com máxima profundidade (1,5 mm) e máximo avanço (0,20 mm/z) cria condições para um desgaste prematuro da ferramenta, transitando em regimes oxidativo e abrasivo. Pelo gráfico pode-se determinar que o mesmo encontra-se no estágio 1 de desgaste de ferramenta.

Teste 4 ($Nb = 0,25\%$, $fz = 0,10$ mm/z, $Vc = 250$ m/min, $ap = 1,5$ mm): Desgaste progressivo moderado até 5m, com aceleração aos 9m ($VB_{m\acute{a}x} \approx 0,158$ mm). Embora utilize menor avanço (0,10 mm/z), a máxima profundidade (1,5 mm) e teor intermediário de nióbio (0,25%) contribuem para desgaste elevado na fase final. Pelo gráfico pode-se determinar que o mesmo se encontra no estágio 2 de desgaste de ferramenta, iniciando no regime permanente.

Teste 7 ($Nb = 0,347\%$, $fz = 0,10$ mm/z, $Vc = 200$ m/min, $ap = 1,0$ mm): Desgaste com comportamento linear até os 9 m ($VB_{m\acute{a}x} \approx 0,171$ mm). O máximo teor de nióbio (0,347%) amplifica a formação de carbonetos NbC primários volumosos que, sob fadiga térmica progressiva, fragmentam-se e intensificam o desgaste abrasivo em estágios avançados. Pelo gráfico pode-se determinar que o mesmo se encontra no estágio 2 de desgaste de ferramenta, iniciando no regime permanente.

Em contraste, ensaios com menor profundidade de corte ($Ap = 0,3-1,0$ mm) — como Testes 1, 2, 5, 6 e 9 — mantiveram $VB_{m\acute{a}x} < 0,10$ mm ao longo de toda a vida da ferramenta.

5.6. ANÁLISE ESTÁTISTICA DE DESGASTE

Para a análise de desgaste de ferramenta utilizou-se o método de Taguchi, como variável dependente e encontrou-se os seguintes valores, dispostos na tabela 7.

Tabela 7 – ANOVA de Taguchi com a variável desgaste

(continua)

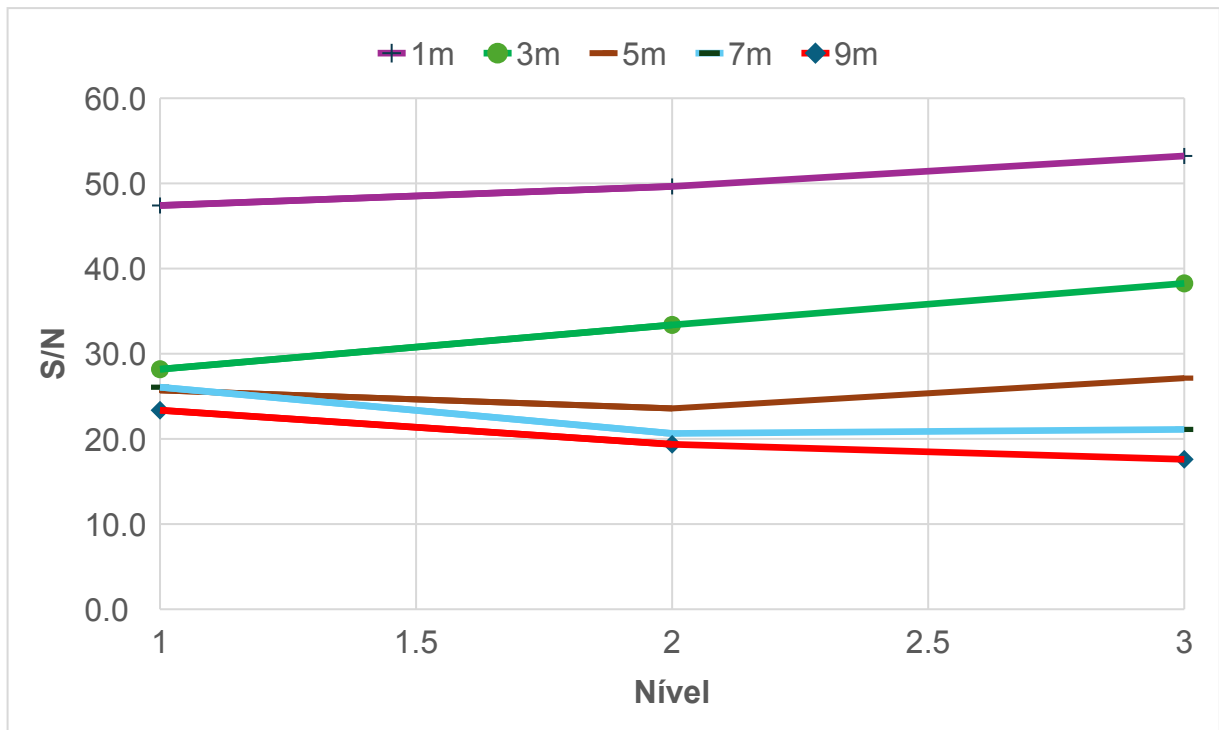
Aplicação de Taguchi por comprimento usinado: Desgaste (Vbmáx)					
1 metro					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	10,30904	2	5,15452	0,26989	0,769426
fz	59,36762	2	29,68381	1,55426	0,263136
Vc	48,36508	2	24,18254	1,26621	0,327679
ap	103,27230	2	51,63615	2,70370	0,120353
Resíduo	171,88490	9	19,09832	-	-
3 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	476,58770	2	238,29380	51,8926	0,000011
fz	93,72189	2	46,86095	10,2048	0,004852
Vc	490,74350	2	245,37170	53,4340	0,000010
ap	304,85630	2	152,42810	33,1939	0,000070
Resíduo	41,32850	9	4,59206	-	-
(conclusão)					
5 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	68,5969	2	34,29845	35,7616	0,000052
fz	2,8701	2	1,43506	1,4963	0,274781
Vc	40,3458	2	20,17292	21,0335	0,000405
ap	38,4620	2	19,23100	20,0514	0,000483
Resíduo	8,6318	9	0,95909	-	-
7 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	11,82400	2	5,91200	5,22414	0,031198
fz	1,94828	2	0,97414	0,86080	0,454908
Vc	15,96873	2	7,98437	7,05538	0,014352
ap	108,56120	2	54,28059	47,96502	0,000016
Resíduo	10,18503	9	1,13167	-	-
9 metros					
	SS	d f	MS	F	p
Nióbio (%)	0,84684	2	0,42342	1,55236	0,263509
fz	55,78922	2	27,89461	102,26770	0,000001
Vc	22,65593	2	11,32796	41,53076	0,000029
ap	104,63990	2	52,31994	191,81620	0,000000
Resíduo	2,45485	9	0,27276	-	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Onde estão presentes a soma quadrática (SS), graus de liberdade (df), média quadrática (MS), F-valor (valor do teste de hipótese de Fischer) e p-valor (indicando a probabilidade).

Na Figura 33 é possível observar a análise da função sinal / ruído da variável desgaste x profundidade de corte nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros. Neste caso, valores superiores de S/N denotam melhor desempenho do processo, isto é, menor variabilidade e menor desgaste sob as mesmas condições de corte, indicando maior estabilidade e qualidade na resposta. Desta forma, pode-se concluir que à medida que a distância de corte aumenta (de 1 m para 9 m), observa-se uma tendência geral de redução dos valores de S/N, o que sugere aumento da variabilidade e maior desgaste da ferramenta.

Figura 33 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x profundidade de corte: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

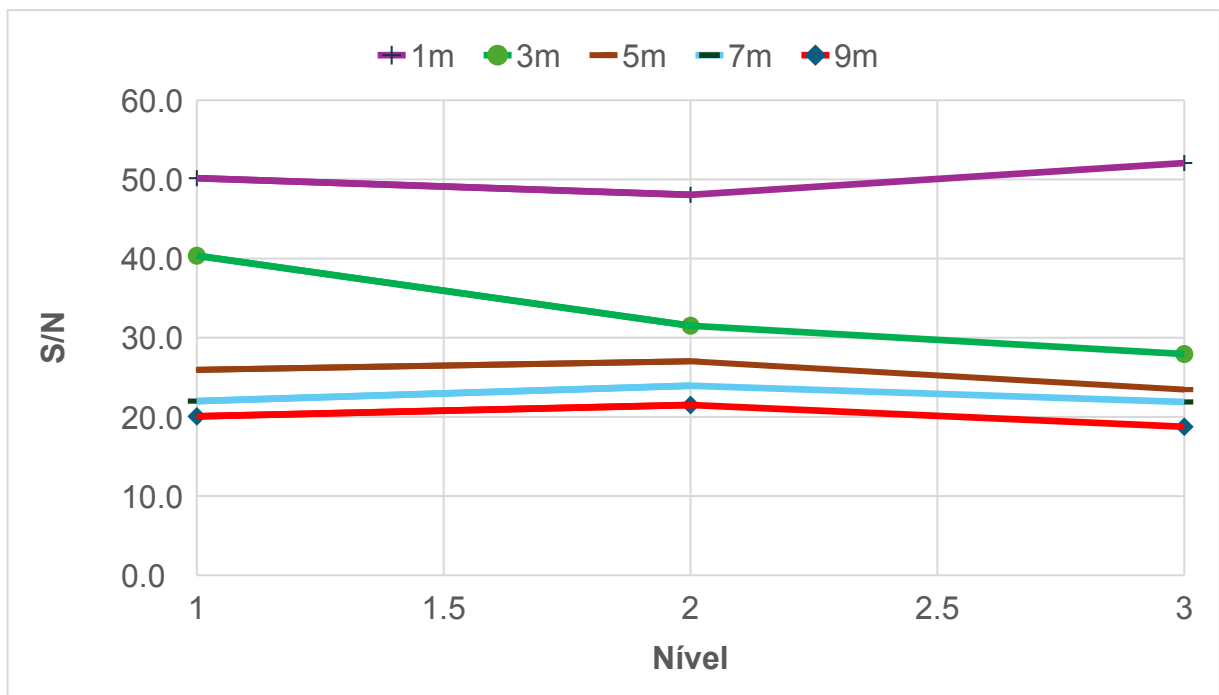
Já em relação aos níveis (0.5 mm; 1,0 mm; 1,5 mm) é possível observar que a profundidade de corte exibe dois comportamentos distintos, onde no início da usinagem (até 3 m), a profundidade de 1,5mm é aquela ao qual traz melhores

condições de usinagem, que o valor da função S/N apresenta os maiores valores. Entretanto no decorrer dos ensaios, aumentando o comprimento usinado, conseqüentemente o desgaste da ferramenta há uma inversão nos papéis, ao qual com 0,5mm de profundidade de corte há a menor relação de sinal-ruído.

Outro ponto identificado é que nos comprimentos iniciais, até 3 metros, a profundidade apresenta correlação estatisticamente significativa com S/N de desgaste: 1m ($r = 0,9912$; $p = 0,0844$) e especialmente 3m ($r = 0,9998$; $p = 0,0118$; $R^2 = 0,9997$).

O mesmo comportamento observado na Figura anterior se repetiu na Figura 34, referente a análise da função sinal / ruído da variável desgaste x velocidade de corte nas mesmas distâncias de corte. Ou seja, à medida que a distância de corte aumenta (de 1m para 9m), observa-se uma tendência geral de redução dos valores de S/N, o que sugere aumento da variabilidade e maior desgaste da ferramenta.

Figura 34 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x velocidade de corte: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Apesar da diminuição dos valores de sinal-ruído, justamente pelo aumento do desgaste da ferramenta, verificou-se uma estabilidade nas curvas, indicando que na faixa de velocidade de corte testada (200-300 m/min) não houve

alteração significativa e impacto no desgaste da ferramenta de forma previsível e sistemática. Utilizando a matriz de Pearson, pode-se afirmar que independente do comprimento analisado não houve valores significativos ($p > 0,05$), que pudessem influenciar no desgaste.

Segundo Reis *et al.* (2022) durante a usinagem em torneamento de ferro fundido cinzento com faixas de velocidade de corte de 200-480 m/min verificou-se que o fator velocidade de corte não contribuiu significativamente nas forças de corte, logo no desgaste da ferramenta.

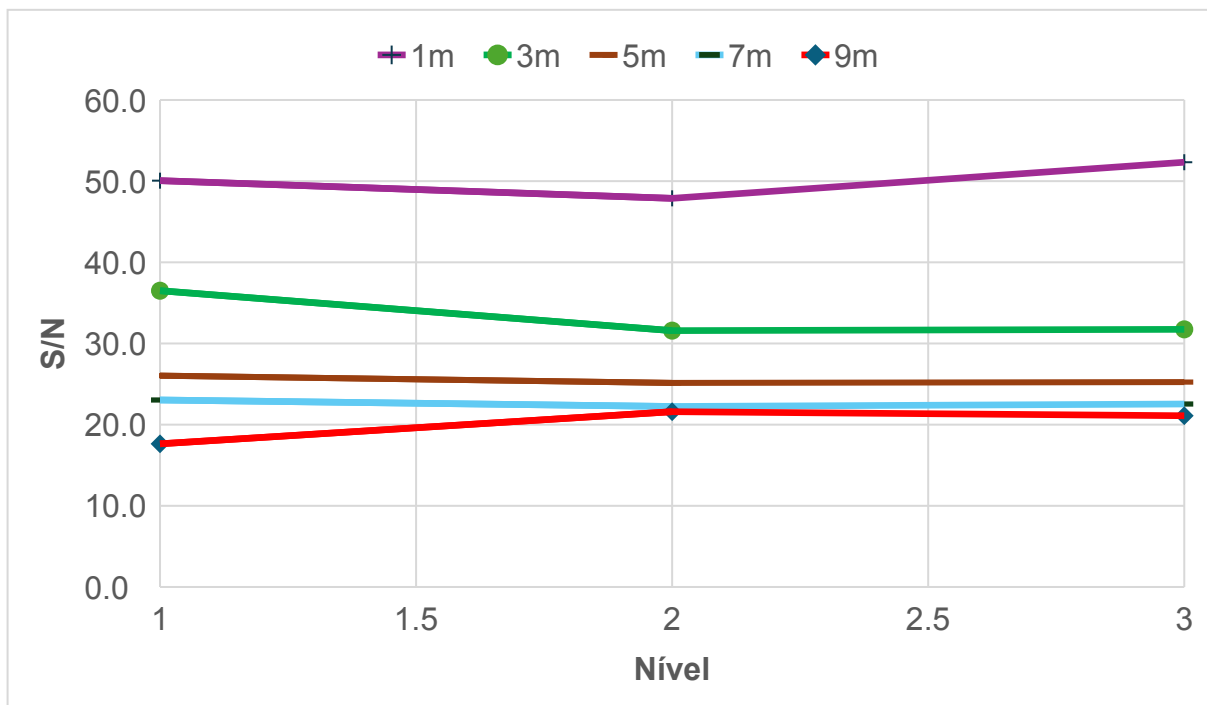
Adicionalmente, a faixa de velocidades testada (200-300 m/min) pode estar em zona de transição entre regimes de desgaste, onde múltiplos mecanismos (abrasão, adesão, difusão, oxidação) coexistem e competem, resultando em efeito líquido neutro.

Em um estudo recente foi demonstrado que na faixa de 250-350 m/min em ferro fundido nodular a velocidade de corte no torneamento, apresentou efeito significativo sobre taxa de desgaste ($p > 0,05$) mas que efeitos térmicos só se tornaram dominantes acima do valor máximo. Logo, recomenda-se manter velocidades intermediárias (250 m/min), priorizando ajustes de avanço e profundidade de corte para controle de desgaste, produtividade e rugosidade (Xavier *et al.*, 2022).

A Figura 35 apresenta a análise da função sinal / ruído da variável desgaste x avanço de corte nas distâncias de corte 1, 3, 5, 7 e 9 metros. Neste caso, valores superiores de S/N também denotam melhor desempenho do processo. Consistente com os resultados anteriores, à medida que a distância de corte aumenta (de 3m para 9m), observa-se uma tendência geral de redução dos valores de S/N, o que sugere aumento da variabilidade e maior desgaste da ferramenta.

Figura 35 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x avanço de

corte: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Apesar da diminuição dos valores de sinal-ruído, justamente pelo aumento do desgaste da ferramenta, verificou-se uma estabilidade nas curvas, indicando que na faixa de avanço de corte testada (0,1-0,2 mm/dente) não houve alteração significativa e impacto no desgaste da ferramenta. Utilizando a matriz de Pearson, pode-se afirmar que independente do comprimento analisado não houve valores significativos ($p > 0,05$), que pudessem influenciar no desgaste. Este resultado contradiz a tendência descrita por El Rayes (2023) que descreve uma forte dependência entre avanço e força de corte, e conseqüentemente, entre avanço e taxa de desgaste, assim como a literatura clássica (El Rayes *et al.*, 2023)

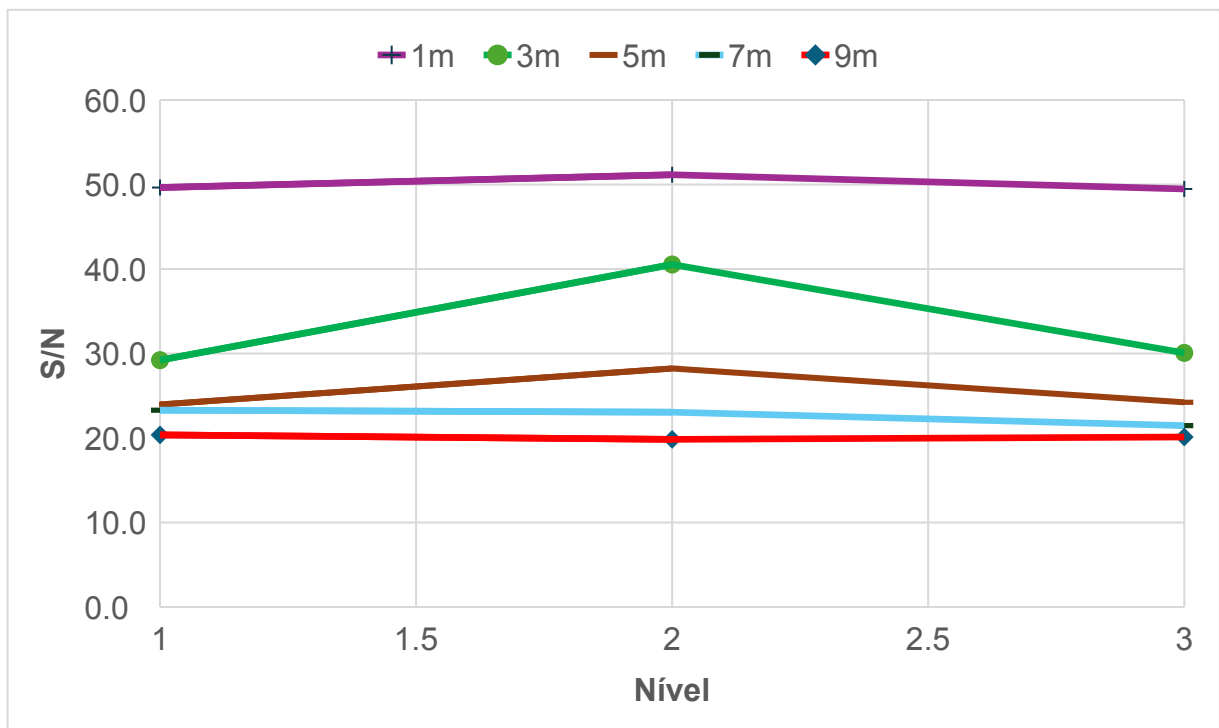
Essa aparente divergência pode ser atribuída às características microestruturais e metalúrgicas específicas do ferro fundido nodular adicionado de nióbio. A adição de nióbio promove a formação de carbonetos NbC na matriz ferrítica, reforçando significativamente a microestrutura da peça e aumentando sua resistência ao desgaste abrasivo (Wang *et al.*, 2024).

Na literatura, Rocha Machado (2015) sugere que o avanço exerce efeito relevante sobre desgaste principalmente em materiais altamente dúcteis (aços austeníticos, ligas de alumínio), onde avanços elevados causam grandes deformações plásticas e acúmulo de calor localizado. Este mecanismo é atenuado em ferros fundidos devido à baixa ductilidade, fragmentação do cavaco em

segmentos curtos, e presença de grafite nodular que reduz atrito e facilita evacuação de calor.

Finalmente na Figura 36 pode-se observar análise da função sinal / ruído da variável desgaste x nióbio nas distâncias de 1 até 9 metros. Relativo à distância cortada o comportamento foi similar as demais variáveis analisadas, ou seja, à medida que a distância de corte aumenta (de 3m para 9m), observa-se uma tendência geral de redução dos valores de S/N.

Figura 36 - Análise da função sinal / ruído da variável desgaste x nióbio: 1 até 9 metros



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Apesar da diminuição dos valores de sinal-ruído, justamente pelo aumento do desgaste da ferramenta, verificou-se uma estabilidade nas curvas, indicando que teor de nióbio não apresentou correlação estatisticamente significativa com desgaste em nenhum comprimento ($p > 0,1$ em todos os casos): onde este resultado contradiz expectativas baseadas em estudos metalúrgicos que demonstram forte efeito de Nb sobre dureza e resistência ao desgaste da peça (Ahmed *et al.*, 2021).

A ausência de significância estatística no presente experimento pode ser atribuída: (1) a faixa estreita de Nb testada (0,20-0,30%), insuficiente para produzir

efeitos mensuráveis; (2) a dominância da profundidade de corte, como fator relevante, sobre desgaste, mascarando efeitos menores.

A adição de nióbio ao ferro fundido nodular promove endurecimento por precipitação de carbonetos NbC e refinamento de perlita, melhorando dureza e reduzindo desgaste da peça, conforme descrito por Silva e colegas (2021) que observaram que 0,5% Nb aumentou a vida da ferramenta em 50-100%, melhorou acabamento e alterou mecanismos de desgaste. Beniwal e colaboradores (2020) confirmaram que Nb eleva dureza e reduz taxa de desgaste em ferros fundidos, com faixa ótima entre 0,25-0,58%. Entretanto, Wang e colegas (2024) identificaram limite crítico acima de 0,14% Nb onde ocorre fragilização, evidenciando um comportamento bifásico onde efeitos iniciais benéficos não se manifestam uniformemente durante toda operação de corte.

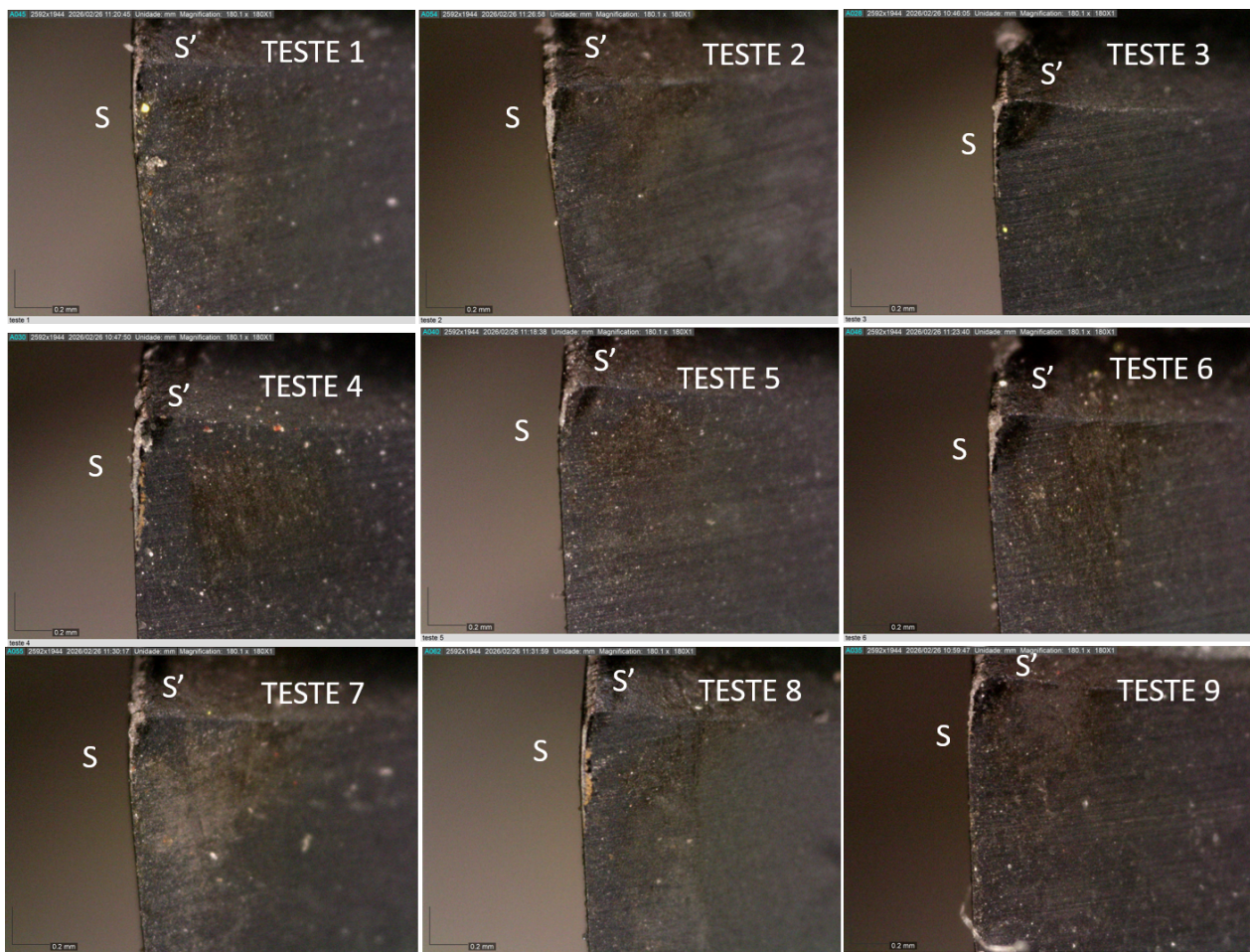
Essa aparente contradição reflete dependência crítica de: (1) teor absoluto de Nb — com valores otimizados entre 0,18-0,25% para ferro fundido nodular; (2) exposição térmica — que ativa oxidação em estágios avançados; (3) tipo de carboneto formado — determinando se reforça ou atua como abrasivo de terceiro corpo; (4) material e revestimento da ferramenta; e (5) progressão do desgaste ao longo do comprimento usinado. Um estudo de Li e colegas (2020) que teores de 0,10-0,15% Nb reduzem desgaste em 64% por refinamento de estrutura, enquanto teores maiores induzem fragilização. Assim, para otimizar o efeito do nióbio é necessário um ajuste de parâmetros de corte conforme evolução do desgaste da ferramenta (Li *et al.*, 2020).

5.7. ANÁLISE MICROSCÓPICA DE DESGASTE

Os ensaios a seguir, são das respectivas microscopias realizadas nos testes 1 até o 9, durante a usinagem dos corpos de prova. A Figura 37 traz os desgastes do gume secundário (S'), ampliados em 180 vezes, afim de analisar o comportamento em cada teste realizado.

Figura 37 – Desgaste da ferramenta do gume secundário (S') com 9 metros

usados

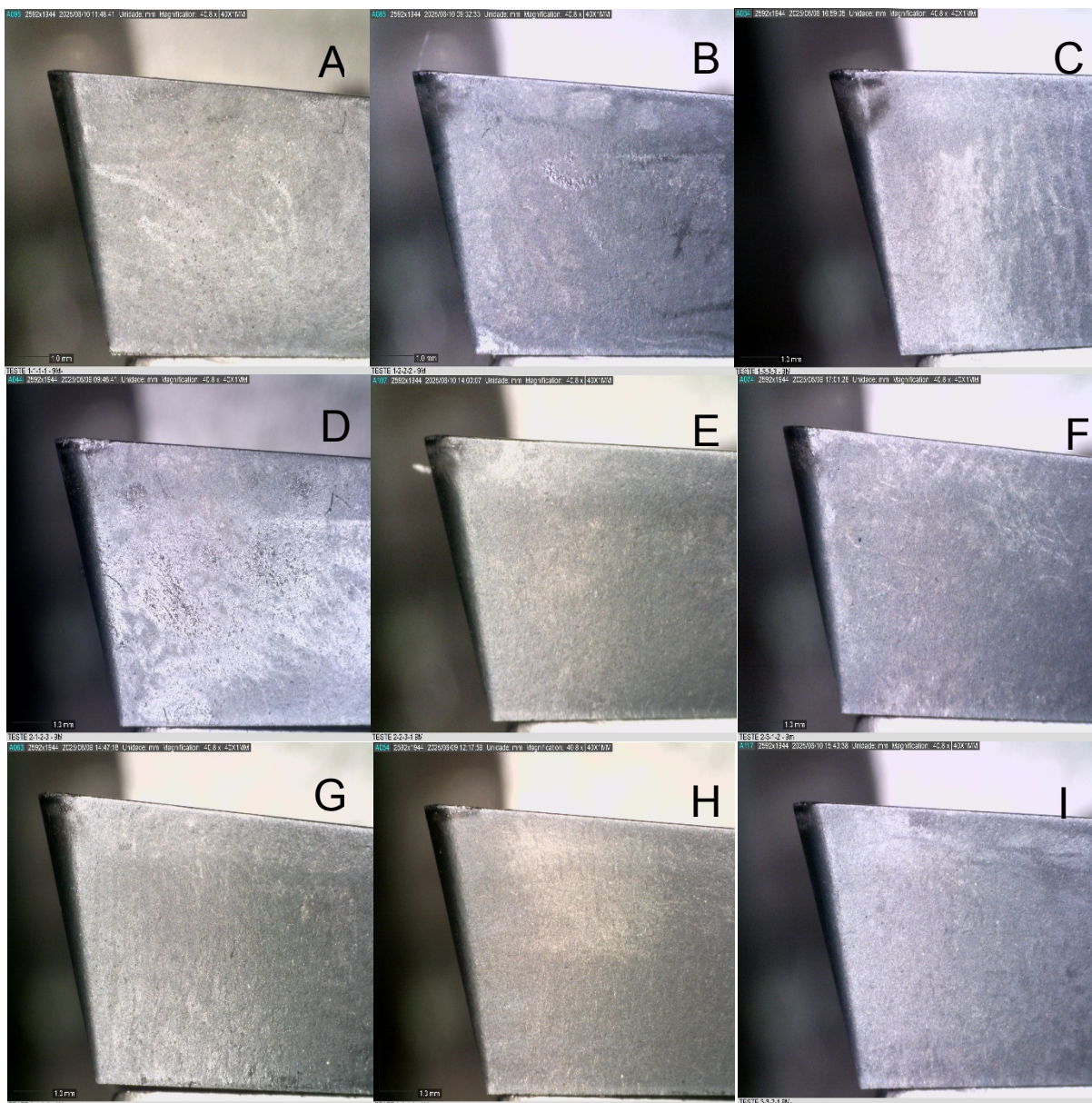


Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

De acordo com as imagens geradas, percebe-se que em todos os ensaios, houve uma concentração de desgaste no raio de ponta, entretanto o gume secundário apresentou resultados inferiores a 0,03mm de $VB_{máx}$, sendo inferior aos desgastes mensurados no gume principal, visto posteriormente.

Os ensaios a seguir são dos respectivos testes executados durante a usinagem dos corpos de prova, medindo o desgaste gerado no gume principal, com ampliação de 40 vezes. Sendo do A ao I os testes 1 ao 9, respectivamente, percebe-se a variação de desgaste gerados na ferramenta de corte com a vida final atingida em 9 metros usinados, conforme Figura 38.

Figura 38 – Desgaste da ferramenta do gume principal (S) com 9 metros usinados



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

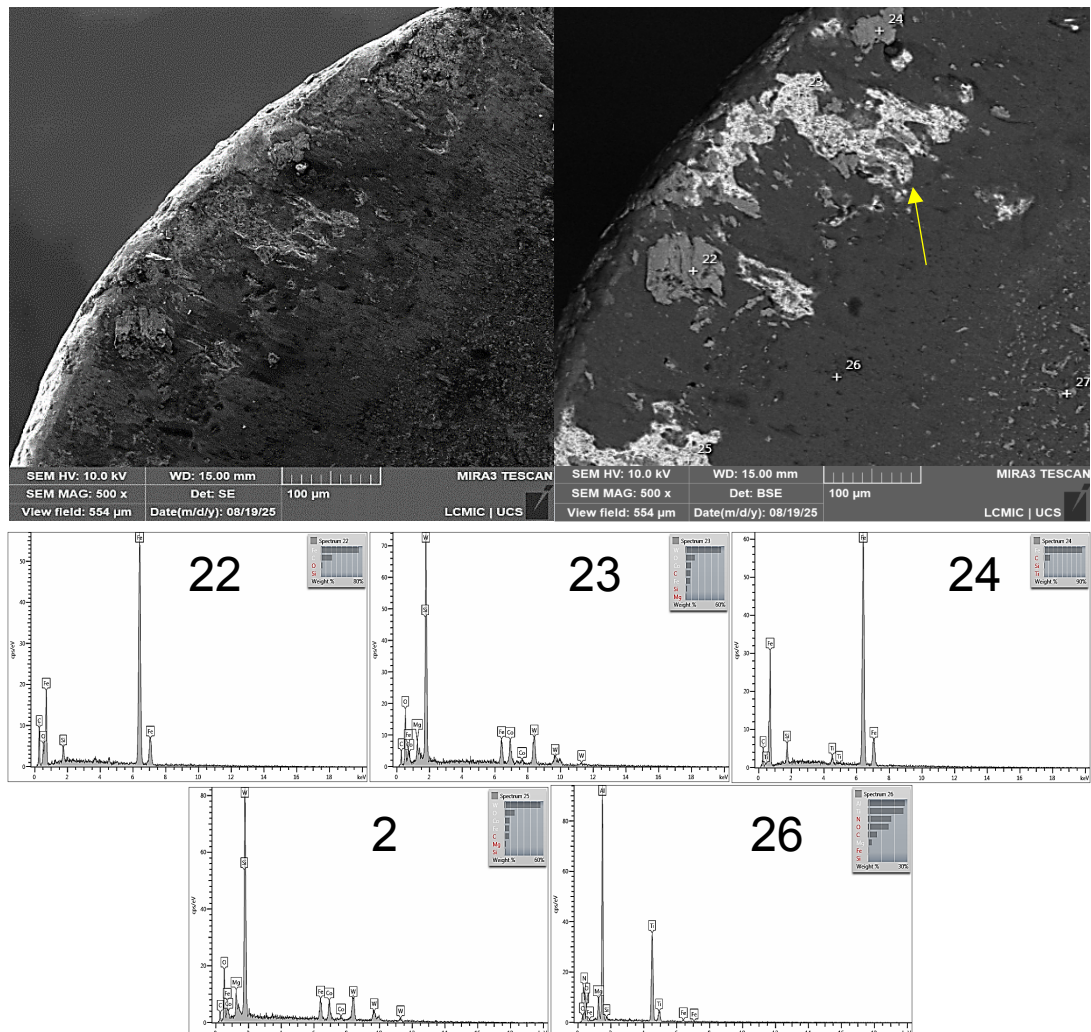
Com as imagens obtidas, verificaram-se distintos padrões de desgaste em cada condição de teste, até 9 metros de usinagem. Para qual, identificou-se desgaste uniforme ($V_{b\text{máx}} < 0,10 \text{ mm}$) nos seguintes testes: Testes 1 (A), 2 (B), 5 (E), 6 (F), e 9 (I).

Já nos testes 3 (C), 4 (D) e 8 (H), identificou-se os maiores valores de desgaste ($V_{b\text{máx}} > 0,12 \text{ mm}$), onde percebe-se o desgaste acentuado com morfologia irregular no gume principal. Estes padrões são consistentes com mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo, analisados posteriormente por análise MEV/EDS. Logo, para os ensaios 3, 4 e 8 foram analisados os mecanismos de

desgastes atuantes durante o processo de usinagem, conforme Figuras 39, 40, 41, 42, 43 e 44, utilizando-se da microscopia eletrônica de varredura (MEV), junto com o EDS, avaliando as regiões do gume e flanco de corte.

A Figura 39 (Teste 3 - Face) apresenta o MEV da face do inserto sob ampliação de 500x após 9 metros de usinagem com parâmetros de: Nb 0,18%, fz 0,20 mm/dente (máximo), Vc 300 m/min (máximo), ap 1,5 mm (máximo). Esta condição de corte apresenta a abrasão como mecanismo predominante de desgaste, entretanto ao analisar o EDS, no ponto 23, encontram-se concentrações elevadas de oxigênio na região desgastada, indicando uma possível atuação de desgaste oxidativo.

Figura 39 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 3 (Face)

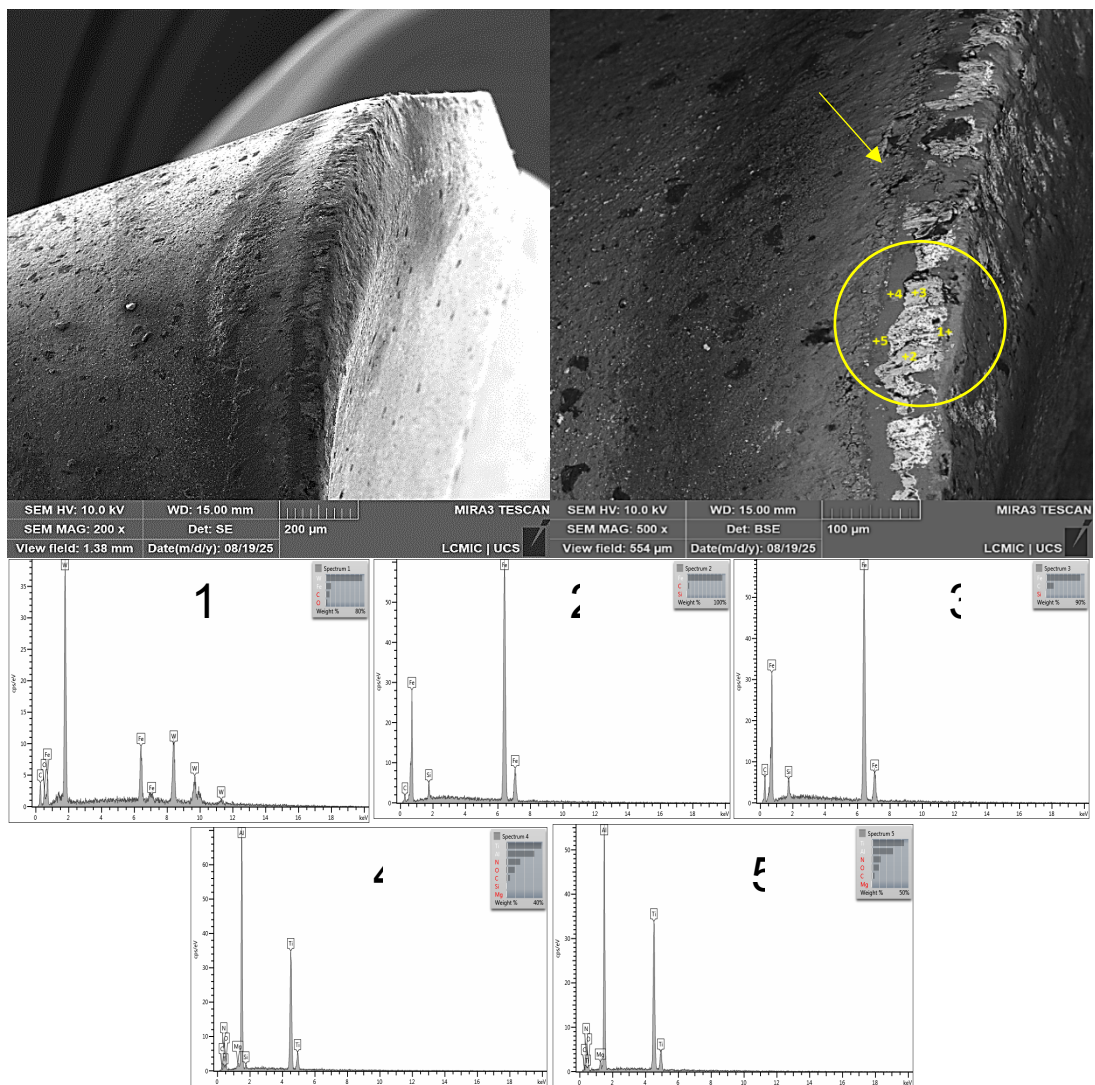


Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Além disso, há o indicativo da predominância de substrato do revestimento da ferramenta de corte, logo podendo existir a adesão de material.

A Figura 40 (Teste 3 - Lateral) apresenta micrografia MEV da região lateral do mesmo inserto (Teste 3), onde a ferramenta sofre desgaste de flanco através de atrito direto com a peça.

Figura 40 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 3 (Lateral)



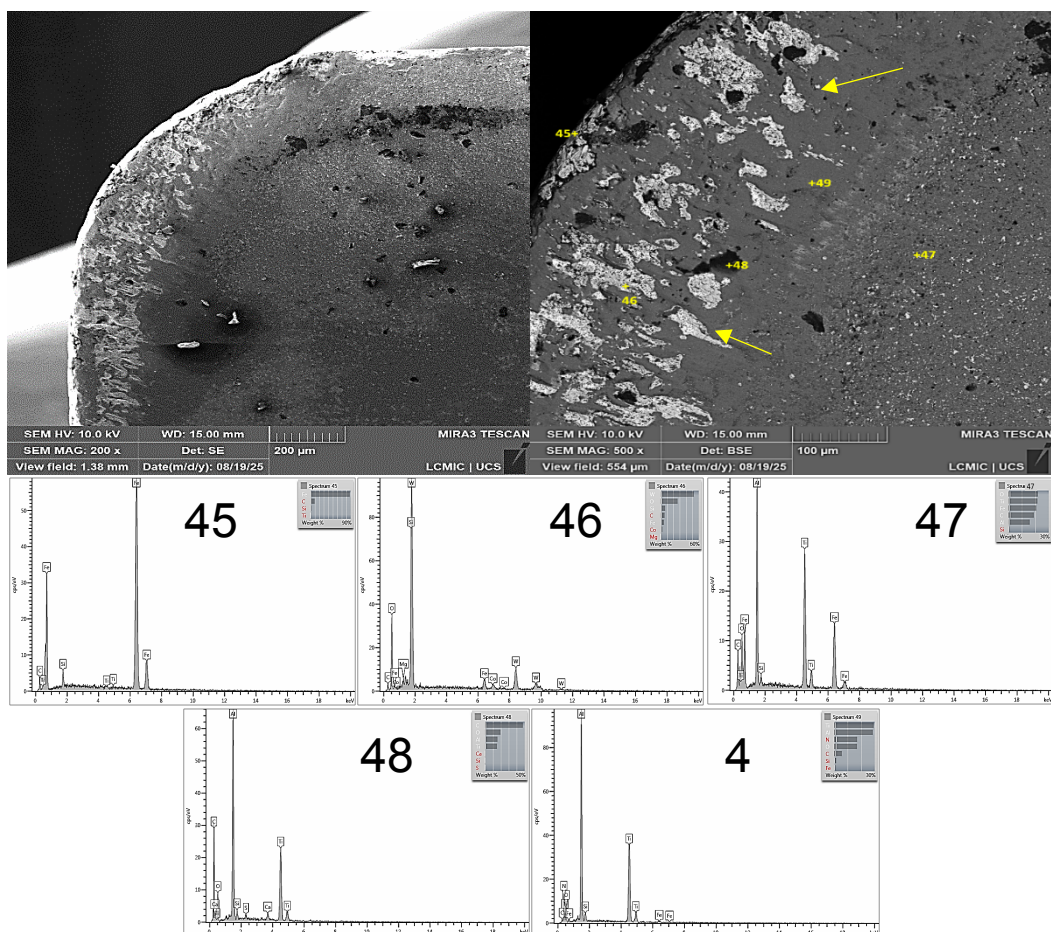
Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Diferente da face, percebe-se a ausência de crateras profundas, sugerindo que a lateral experimenta menores temperaturas que a face, entretanto há indícios de material aderido na ferramenta, indicando um possível desgaste por adesão. A lateral da ferramenta sofre predominantemente desgaste

abrasivo causado por partículas duras (carbonetos NbC) arrastadas pelo cavaco. O avanço máximo ($F_z = 0,20$ mm/z no Teste 3) amplifica a espessura de cavaco, podendo aumentar a carga mecânica sobre a lateral.

A Figura 41 (Teste 8 - Face) apresenta micrografia MEV da face do inserto sob máximo teor de nióbio testado, avanço intermediário, velocidade de corte baixa e profundidade de corte máxima. A baixa velocidade mitiga oxidação, mas o teor extremo de Nb pode ativar mecanismos abrasivos.

Figura 41– Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 8 (Face)



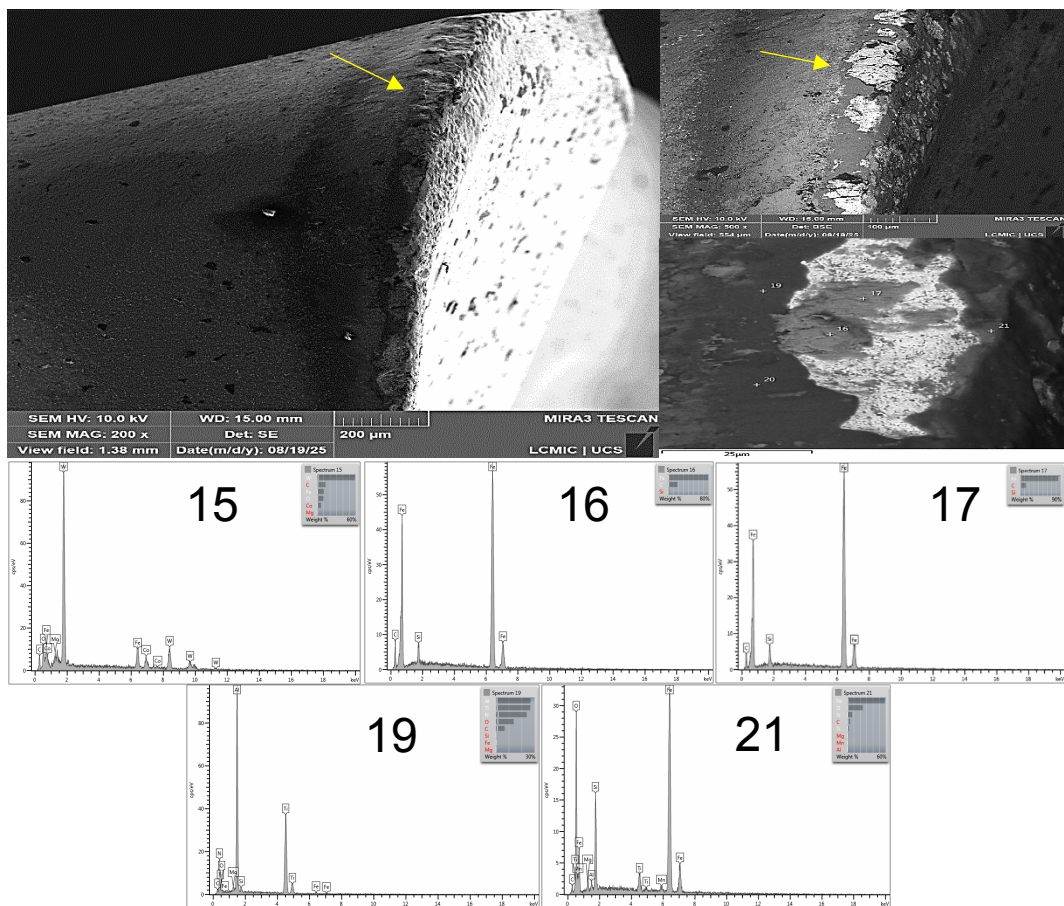
Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

A micrografia MEV da face do Teste 8 apresenta indícios de desgaste abrasivo em parte da face, sendo favorecido pelo da profundidade de corte e possível presença de carbonetos de NbC, já que há o máximo teor de nióbio (0,347%) no Teste 8 resultando em maior densidade de carbonetos NbC primários na matriz do ferro fundido. Embora a velocidade de corte seja moderada ($V_c = 200$ m/min), a profundidade máxima ($A_p = 1,5$ mm) gera alta carga mecânica,

promovendo fragmentação de carbonetos NbC. Os fragmentos (dureza 2400-3000 HV) atuam como abrasivos de terceiro corpo, intensificando o desgaste da ferramenta (Penagos *et al.*, 2017).

A Figura 42 apresenta micrografia MEV da região lateral (flanco) do inserto do Teste 8 após 9 metros de usinagem.

Figura 42 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 8 (Lateral)



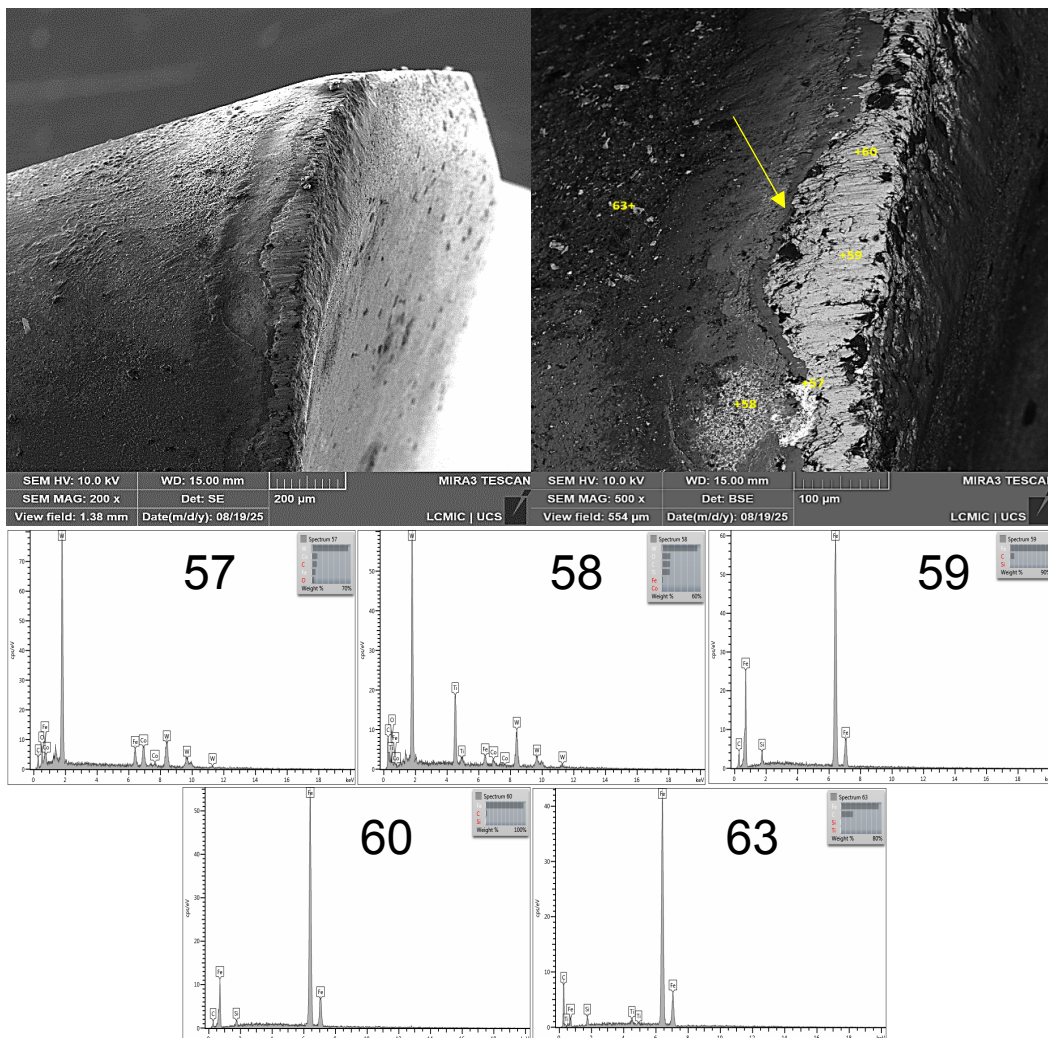
Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Ao analisar o desgaste lateral, percebe-se indícios de material aderido como identificado nos EDS 16, 17 e 21 (indicado por seta). A combinação de alto Nb (0,347%) com $A_p = 1,5$ mm pode gerar condições do surgimento de abrasão de terceiro corpo. Os fragmentos de NbC atuam como granalha abrasiva contínua, causando micro-riscamento e micro-adesão repetida. Beniwal e colegas (2020) confirmam este mecanismo: teores de Nb acima de 0,25% podem reduzir propriedades abrasivas da peça pela formação de flocos de grafita adicionais, alterando comportamento tribológico. A profundidade crítica A_p 1,5 mm intensifica

cavaco, maximizando a razão de comprimento para espessura, favorecendo formação de cavaco contínuo e aderido. Embora menor volume de material seja removido por ciclo, a duração estendida de contato favorece o desgaste citado.

Por fim, na Figura 44 apresentou-se a micrografia MEV da região lateral do Teste 4, oferecendo visão complementar sobre como o mecanismo de adesão manifestado na lateral (flanco) em contraste com a face.

Figura 44 – Desgaste da ferramenta com 9 metros usinados – Teste 4 (Lateral)



Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2025).

Comparado com a face lateral, percebe-se uma redução do desgaste, entretanto há indícios de que houve maior quantidade de material aderido (indicado por seta), oriundo do avanço de corte ser baixo.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo investigou o fresamento de ferro fundido nodular com adição de nióbio (0,18–0,347% em peso) mediante planejamento experimental de Taguchi e análises estatísticas avançadas (ANOVA, correlação de Pearson), combinadas com caracterização tribológica por MEV/EDS. Os resultados estabeleceram relações quantitativas entre parâmetros de processo, microestrutura do material e desempenho em usinagem. O avanço de corte (f_z) surgiu como o parâmetro de maior significância para rugosidade ($p < 0,05$), com correlações de Pearson superiores a 0,99 ($R^2 > 0,99$).

O desgaste de ferramenta não apresentou significância com as variáveis de estudo e o principal mecanismo de desgaste transitou entre a abrasão, adesão e um indicativo de oxidação.

Através da análise de Taguchi, conclui-se que os níveis ótimos foram $f_z = 0,10$ mm/dente; $V_c = 250$ m/min; profundidade de corte, variando conforme o comprimento usinado, iniciando com 1,5mm e diminuindo para 0,5mm, e o teor ótimo de Nb = 0,25% em peso, promovendo refinamento da matriz perlítica e formação controlada de carbonetos resultando em $R_a = 1,1\mu\text{m}$ e $VB_{\text{máx}} = 0,09$ aos 9 metros de usinagem.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar teores superiores (0,35–0,50% Nb) para identificar limites críticos de fragilização e ineficácia tecnológica
- Estudar o efeito de elementos de liga associados (Mo, V, Cr) em combinação com nióbio
- Comparar geometrias e quebra-cavacos de insertos para otimizar fluxo de material usinado
- Avaliar impacto dos parâmetros otimizados em taxa de produção, qualidade e custos reais
- Investigar os mecanismos de desgaste em processo de furação e mandrilhamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIFA. **Indústria de fundição cresce +20,3% em 2021**. Disponível em: <<https://abifa.org.br/site/producao-de-fundidos-cresce-26-no-acumulado-de-janeiro-a-maio-de-2025/>>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- AHMED, Mostafa *et al.* Effect of Niobium on the Microstructure and Mechanical Properties of Alloyed Ductile Irons and Austempered Ductile Irons. **Metals**, v. 11, n. 5, p. 703, 25 abr. 2021.
- ALMEIDA, Déborah Oliveira. **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharias)—Uberlândia, Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ANTONY, Jiju *et al.* An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process. **Assembly Automation**, v. 26, n. 1, p. 18–24, 1 jan. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO3685: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. 2017.
- BENIWAL, Gaurav; SAXENA, Kuldeep K. Effect of niobium addition in grey cast iron: A short review. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 2337–2343, 2020.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sumário Mineral**. Brasília. Agência Nacional de Mineração. 2019.
- BRIAN SANDALOW. Faircast's Fresh Start, Modern Casting. **AMERICAN FOUNDRY SOCIETY - MODERN CASTING STAFF REPORT**, p. 18–27, 2018.
- CHEN, Xiangru *et al.* Effects of niobium addition on microstructure and tensile behavior of as-cast ductile iron. **Materials Science and Engineering: A**, v. 688, p. 416–428, mar. 2017.
- CHEN, Xiang-Ru *et al.* Molybdenum alloying in cast iron and steel. **Advances in Manufacturing**, v. 8, n. 1, p. 3–14, 10 mar. 2020.
- CHIKALI, P. B.; SHINDE, V. D. Analysis of machinability in ductile iron casting. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 584–588, 2020.
- DINIZ, Anselmo Eduardo.; MARCONDES, Francisco Carlos.; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9ª edição ed. São Paulo, SP: Artliber Editora, 2014.
- DURAND-CHARRE, Madeleine. **Microstructure of Steels and Cast Irons**. [S.l.: S.n.].

EL RAYES, Magdy *et al.* Investigation and Statistical Analysis for Optimizing Surface Roughness, Cutting Forces, Temperature, and Productivity in Turning Grey Cast Iron. **Metals**, v. 13, n. 6, p. 1098, 10 jun. 2023.

ELLIOTT, Roy. **Cast iron technology**. [S.l.]: Butterworths, 1988.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2013. E-book.

FOGLIATTO, Flavio S. Robust design and analysis for quality engineering. **IIE Transactions**, v. 29, n. 12, p. 1084–1086, 1997.

ISCAR DO BRASIL. **Technical articles**. Disponível em: <<https://www.iscardobrasil.com.br/en-hq/technical-articles>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KALPAKJIAN, Serope.; SCHMID, Steven R. .. **Manufacturing engineering and technology**. [S.l.]: Pearson, 2020.

KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren 3**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1997.

KLOCKE, Fritz.; KUCHLE, Aaron. **Manufacturing processes**. [S.l.]: Springer, 2011.

LARANJO, F. M. **Desenvolvimento de um sistema para controle de vida útil de ferramentas críticas dos fornecedores numa empresa do setor automóvel**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2024.

LI, Qiangguo *et al.* Influence of Sn and Nb additions on the microstructure and wear characteristics of a gray cast iron. **Applied Physics A**, v. 126, n. 4, p. 282, 19 abr. 2020.

LU, Juan *et al.* Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression. **Measurement**, v. 157, p. 107578, jun. 2020.

MELO, Anderson; TEN CATEN, Carla Schwengber; SANT'ANNA, Angelo M. O. Otimização dos parâmetros de usinagem na manufatura do ferro fundido. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 1, p. 375–388, 10 mar. 2013.

MOHRBACHER, Hardy; LEUVEN, K. U. **On the metallurgical effects of Niobium in cast iron alloys**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/333652963>>.

MONTGOMERY, Douglas C. .. **Design and analysis of experiments**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

PENAGOS, J. J. *et al.* Synergetic effect of niobium and molybdenum on abrasion resistance of high chromium cast irons. **Wear**, v. 376–377, p. 983–992, abr. 2017.

PERO-SANZ ELORZ, José Antonio; FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Daniel; VERDEJA, Luis Felipe. **Physical Metallurgy of Cast Irons**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

RAUT, Yogesh; BAHEKAR, Amit. Optimization of Parameters to Reduce the Surface Roughness in Face Milling Operation on Cast Iron Work piece Applying Taguchi Method. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 68, n. 1, p. 9–13, 25 jan. 2020.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha. **Influência da Adição de Nióbio sobre a Usinabilidade de Ferro Fundido Cinzento Perlítico na Operação de Torneamento**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

RESENDE, Roberto Cesar. **Produção de ferro fundido nodular e determinação de suas propriedades com e sem a presença de nióbio**. Dissertação (Mestrado)—Caxias do Sul, RS.: Universidade de Caxias do Sul, 2025.

ROCHA MACHADO, Álisson. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. [S.l.]: BLUCHER, 2015.

ROSA, Guilherme Cortelini. **Estudo Da Usinabilidade No Torneamento A Seco Do Aço Inoxidável Martensítico Aisi 420 C Endurecido Com Ferramenta De Metal-Duro**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)—Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

SANDVIK COROMANT. **Desgaste nas arestas de corte**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. Acesso em: 12 dez. 2025.

SANTOS, Thaianne da Cruz *et al.* UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE REVESTIDAS EM PROCESSOS DE USINAGEM. *In*: São Paulo: Editora Blucher, nov. 2019.

SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz. Cutting Tool Wear Prediction in Machining Operations, A Review. v. 15, p. 15–26, 9 out. 2022.

SOUZA, Tânia Nogueira Fonseca *et al.* Mechanical and microstructural characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. **Materials Research**, v. 17, n. 5, p. 1167–1172, out. 2014.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. [S.l.]: Ed. da UFSC, 2005.

WANG, Haojie *et al.* Effect of Niobium on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron with High Strength and Ductility. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 33, n. 2, p. 896–905, 6 jan. 2024.

XAVIER, Tiago Silvério Guimarães *et al.* Influence of Si content on the machinability of ductile iron. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 19, p. e2668, 2022.

APÊNDICE A

Tabela 8 – Dados experimentais de rugosidade e desgaste

NIÓBIO (%)	AVANÇO POR FACA (mm/fz)	VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	PROFUNDIDADE DE CORTE (mm)	RUGOSIDADE (Ra)	DESGASTE (VBmax)
0.18	0.1	200	0.3	1,444	0,005
0.18	0.15	250	1	1,701333	0,004
0.18	0.2	300	1.5	1,892333	0,002
0.25	0.1	250	1.5	1,433333	0,003
0.25	0.15	300	0.3	1,15	0,005
0.25	0.2	200	1	2,04	0,001
0.347	0.1	300	1	1,001333	0,002
0.347	0.15	200	1.5	1,134333	0,003
0.347	0.2	250	0.3	1,997	0,004
0.18	0.1	200	0.3	1,461333	0,004
0.18	0.15	250	1	1,704667	0,008
0.18	0.2	300	1.5	2,013667	0,001
0.25	0.1	250	1.5	1,424333	0,002
0.25	0.15	300	0.3	1,462	0,003
0.25	0.2	200	1	2,110667	0,005
0.347	0.1	300	1	0,9675	0,004
0.347	0.15	200	1.5	1,176	0,003
0.347	0.2	250	0.3	2,172667	0,005
0.18	0.1	200	0.3	1,040667	0,018
0.18	0.15	250	1	1,256667	0,055
0.18	0.2	300	1.5	2,138	0,042
0.25	0.1	250	1.5	0,953667	0,004
0.25	0.15	300	0.3	1,088667	0,04
0.25	0.2	200	1	2,099	0,003
0.347	0.1	300	1	1,05	0,038
0.347	0.15	200	1.5	1,921333	0,01
0.347	0.2	250	0.3	1,397667	0,088
0.18	0.1	200	0.3	1,075	0,02
0.18	0.15	250	1	1,258	0,047
0.18	0.2	300	1.5	2,208	0,044
0.25	0.1	250	1.5	0,987	0,005
0.25	0.15	300	0.3	1,221667	0,036
0.25	0.2	200	1	2,151333	0,008
0.347	0.1	300	1	1,102	0,041
0.347	0.15	200	1.5	1,861667	0,009
0.347	0.2	250	0.3	1,258333	0,077
0.18	0.1	200	0.3	1,078	0,05
0.18	0.15	250	1	2,121333	0,067
0.18	0.2	300	1.5	2,029333	0,073

0.25	0.1	250	1.5	0,839667	0,021
0.25	0.15	300	0.3	1,276333	0,05
0.25	0.2	200	1	1,897333	0,044
0.347	0.1	300	1	1,065667	0,088
0.347	0.15	200	1.5	1,587667	0,052
0.347	0.2	250	0.3	2,388333	0,055
0.18	0.1	200	0.3	1,188	0,06
0.18	0.15	250	1	2,227333	0,07
0.18	0.2	300	1.5	1,962667	0,063
0.25	0.1	250	1.5	0,799667	0,03
0.25	0.15	300	0.3	1,355	0,049
0.25	0.2	200	1	1,926767	0,05
0.347	0.1	300	1	1,051	0,093
0.347	0.15	200	1.5	1,624	0,048
0.347	0.2	250	0.3	2,424	0,048
0.18	0.1	200	0.3	1,055333	0,05
0.18	0.15	250	1	1,387	0,082
0.18	0.2	300	1.5	2,209333	0,092
0.25	0.1	250	1.5	0,884333	0,062
0.25	0.15	300	0.3	1,527667	0,053
0.25	0.2	200	1	1,979	0,09
0.347	0.1	300	1	1,094667	0,109
0.347	0.15	200	1.5	1,559333	0,12
0.347	0.2	250	0.3	2,289667	0,06
0.18	0.1	200	0.3	1,066333	0,044
0.18	0.15	250	1	1,431333	0,072
0.18	0.2	300	1.5	2,299333	0,086
0.25	0.1	250	1.5	0,9245	0,075
0.25	0.15	300	0.3	1,51	0,054
0.25	0.2	200	1	2,030667	0,101
0.347	0.1	300	1	1,087333	0,11
0.347	0.15	200	1.5	1,54	0,105
0.347	0.2	250	0.3	2,708667	0,04
0.18	0.1	200	0.3	1,078667	0,086
0.18	0.15	250	1	1,319	0,072
0.18	0.2	300	1.5	1,950333	0,128
0.25	0.1	250	1.5	1,05	0,15
0.25	0.15	300	0.3	1,356333	0,071
0.25	0.2	200	1	2,213	0,09
0.347	0.1	300	1	1,481333	0,163
0.347	0.15	200	1.5	1,780667	0,11
0.347	0.2	250	0.3	1,732	0,051
0.18	0.1	200	0.3	1,089333	0,09
0.18	0.15	250	1	1,344333	0,078
0.18	0.2	300	1.5	1,937333	0,139
0.25	0.1	250	1.5	0,954667	0,158

0.25	0.15	300	0.3	1,367	0,067
0.25	0.2	200	1	2,327333	0,11
0.347	0.1	300	1	1,57	0,171
0.347	0.15	200	1.5	1,818333	0,113
0.347	0.2	250	0.3	1,735	0,0521

Fonte: O autor (2025)

APÊNDICE B

Tabela 9 – Dados da matriz de Pearson de rugosidade e desgaste

Variável de Saída	Variável de Entrada	Comprimento usinado	r	R ²	p-valor
Desgaste	Avanço de corte	1 metro	0,510	0,261	0,659
Desgaste	Avanço de corte	3 metros	-0,852	0,725	0,351
Desgaste	Avanço de corte	5 metros	-0,809	0,654	0,400
Desgaste	Avanço de corte	7 metros	-0,614	0,377	0,579
Desgaste	Avanço de corte	9 metros	0,803	0,644	0,407
Desgaste	Nióbio (%)	1 metro	-0,092	0,008	0,941
Desgaste	Nióbio (%)	3 metros	0,068	0,005	0,957
Desgaste	Nióbio (%)	5 metros	0,055	0,003	0,965
Desgaste	Nióbio (%)	7 metros	-0,919	0,845	0,257
Desgaste	Nióbio (%)	9 metros	-0,475	0,225	0,685
Desgaste	Profundidade de corte	1 metro	0,991	0,983	0,084
Desgaste	Profundidade de corte	3 metros	1,000	1,000	0,012
Desgaste	Profundidade de corte	5 metros	0,399	0,159	0,739
Desgaste	Profundidade de corte	7 metros	-0,824	0,679	0,384
Desgaste	Profundidade de corte	9 metros	-0,976	0,952	0,140
Desgaste	Velocidade de corte	1 metro	0,477	0,227	0,684
Desgaste	Velocidade de corte	3 metros	-0,971	0,943	0,153
Desgaste	Velocidade de corte	5 metros	-0,680	0,462	0,524
Desgaste	Velocidade de corte	7 metros	-0,047	0,002	0,970
Desgaste	Velocidade de corte	9 metros	-0,478	0,228	0,683
Rugosidade	Avanço de corte	1 metro	-0,930	0,864	0,240
Rugosidade	Avanço de corte	3 metros	-0,999	0,999	0,023
Rugosidade	Avanço de corte	5 metros	-0,977	0,954	0,137
Rugosidade	Avanço de corte	7 metros	-1,000	1,000	0,011
Rugosidade	Avanço de corte	9 metros	-0,998	0,996	0,042
Rugosidade	Nióbio (%)	1 metro	0,979	0,959	0,130

Rugosidade	Nióbio (%)	3 metros	0,347	0,120	0,775
Rugosidade	Nióbio (%)	5 metros	0,200	0,040	0,872
Rugosidade	Nióbio (%)	7 metros	-0,525	0,275	0,648
Rugosidade	Nióbio (%)	9 metros	-0,940	0,883	0,222
Rugosidade	Profundidade de corte	1 metro	0,992	0,984	0,081
Rugosidade	Profundidade de corte	3 metros	-0,988	0,976	0,100
Rugosidade	Profundidade de corte	5 metros	0,597	0,357	0,593
Rugosidade	Profundidade de corte	7 metros	0,821	0,674	0,387
Rugosidade	Profundidade de corte	9 metros	-0,533	0,284	0,642
Rugosidade	Velocidade de corte	1 metro	0,471	0,222	0,688
Rugosidade	Velocidade de corte	3 metros	0,471	0,222	0,688
Rugosidade	Velocidade de corte	5 metros	0,516	0,266	0,655
Rugosidade	Velocidade de corte	7 metros	-0,733	0,538	0,476
Rugosidade	Velocidade de corte	9 metros	0,131	0,017	0,916

Fonte: O autor (2025)