

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
ENGENHARIA MECÂNICA

Vinicius Soares Dorcino

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO NO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO**
ensaio pino-sobre-disco contra pino de metal duro

Betim - MG
2026

VINICIUS SOARES DORCINO

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO NO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO
ensaio pino-sobre-disco contra pino de metal duro**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais -
Campus Betim para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fon-
seca

Betim - MG
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

D694i Dorcino, Vinicius Soares

Influência da adição de nióbio no comportamento tribológico de ferro fundido branco alto cromo ensaio pino-sobre-disco contra pino de metal duro / Vinicius Soares Dorcino. – 2026.

45 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

1. Tribologia. 2. Fundição. 3. Nióbio. 4. Ferro fundido. 5. Engenharia Mecânica.
I. Dorcino, Vinicius Soares. II. Título

CDU: 621.7



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica

Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 18 dias do mês de Julho do ano de 2026, às nove horas, nas dependências do IFMG – *Campus* Betim, sala 01, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Flávio Magno de Carvalho Fonseca e demais membros, Evanilton José Alves Barbosa e Rogério Eustáquio de Sousa. Nesta ocasião o discente **Vinicius Soares Dorcino** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0066213 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Influência da adição de nióbio no comportamento tribológico de ferro fundido branco alto cromo: ensaio pino-sobre-disco contra pino de metal duro**” e foi APROVADO, com 85 (oitenta e cinco) pontos. A sessão foi encerrada às onze horas. Para constar, eu, Flávio Magno de Carvalho Fonseca, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelos membros da banca examinadora.

Betim, 18 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Magno de Carvalho Fonseca, Professor**, em 21/07/2026, às 20:32, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Eustaquio de Souza, Professor**, em 22/07/2026, às 09:42, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Evanilton Jose Alves Barbosa, Professor**, em 23/07/2026, às 19:42, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2813600** e o código CRC **8B2160E2**.

23792.000877/2026-74

2813600v1

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, saúde e perseverança ao longo de toda essa jornada acadêmica, permitindo que eu chegasse até este momento tão importante.

Aos meus pais, Adeir Dorcino e Cleusa dos Santos Soares Dorcino, minha eterna gratidão por todo amor, dedicação, ensinamentos e apoio incondicional. Vocês são a base de tudo que sou e sempre foram meu maior exemplo de força e caráter.

À minha esposa Gabrielle, agradeço profundamente por estar ao meu lado em todos os momentos, pela paciência, compreensão e incentivo constante. Sua presença foi essencial para que eu não desistisse diante das dificuldades.

Aos meus irmãos, Rafael Dorcino e Felipe Dorcino, pelo companheirismo, apoio e amizade ao longo de toda a minha caminhada.

Aos meus amigos Rafael Soares, Wesley Soares, Leonardo de Oliveira, Nicomedes Alves e Julio Dorcino, que contribuíram diretamente para minha formação acadêmica e profissional, seja com apoio, conselhos ou momentos de incentivo.

Ao meu professor orientador Flávio Magno, pela orientação, paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento ao longo deste trabalho, contribuindo de forma significativa para a sua realização, e aos professores que puderam me acompanhar ao longo da minha formação.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada e contribuíram para a concretização deste sonho.

RESUMO

Este trabalho analisou a influência da adição de nióbio (0 %, 0,5 % e 1 % em peso) sobre o coeficiente de atrito e a morfologia da pista de desgaste em ferro fundido branco alto cromo (FFAC) da classe ASTM A532 III A, submetido a ensaio de desgaste do tipo pino-sobre-disco conforme a norma ASTM G99. O contracorpo foi um pino de metal duro (WC-Co). Para cada uma das três ligas foram medidas: dureza Rockwell C, rugosidade Ra pré-teste, série temporal completa de coeficiente de atrito (COF) ao longo de 10 minutos de ensaio e quarenta e três imagens da pista de desgaste. As imagens foram segmentadas no ImageJ com a ferramenta *Trainable Weka Segmentation* em duas classes — fragmentos (FRAG) e pista contínua (PISTA). Os coeficientes de atrito em regime de *running-in* (0–15 s) e em regime estacionário (15–600 s) cresceram de forma uniforme com o teor de nióbio ($\mu_{R2} = 0,494 \rightarrow 0,565 \rightarrow 0,627$), com diferenças estatisticamente significativas (ANOVA, $p < 10^{-3}$). A dureza permaneceu praticamente constante (em torno de 51–52 HRC). A fração de área ocupada por fragmentos na pista quase dobrou com a adição de 0,5 % de nióbio (15 % $\rightarrow$ 29 %), e a fração de pista contínua caiu de 55 % para 43 %. A regressão linear $\mu_{R2} = 0,133 \cdot \%Nb + 0,495$ ($R^2 = 0,999$; $p = 0,022$) descreveu a tendência. A correlação entre o coeficiente de atrito no regime estacionário e a fração de pista contínua foi de $-0,82$ (Pearson). Conjugando a evidência microestrutural reportada por MELO (2018) — redução da fração volumétrica de carbonetos e aumento das dendritas pró-eutéticas com Nb — e a evidência tribológica obtida neste trabalho, propõe-se que o mecanismo de desgaste dominante migra de adesivo/abrasivo controlado para delaminação com formação de terceiro corpo, justificando o aumento de atrito sem variação da dureza.

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento. Ferro fundido branco alto cromo. Nióbio. Pino-sobre-disco. Segmentação de imagem.

ABSTRACT

This work investigated the effect of niobium additions (0, 0.5 and 1 wt %) on the friction coefficient and wear-track morphology of high-chromium white cast iron (HCWCI, ASTM A532 class III A) tested in a pin-on-disk configuration (ASTM G99). The counter-body was a tungsten carbide (WC-Co) pin. For each of the three alloys we measured Rockwell C hardness, pre-test Ra surface roughness, the complete time series of the coefficient of friction (COF) during ten minutes of sliding, and forty-three images of the wear track. The images were segmented in ImageJ with the *Trainable Weka Segmentation* plug-in into two classes — fragments (FRAG) and continuous track (PISTA). The COF in both the running-in (0–15 s) and steady-state (15–600 s) regimes increased uniform with Nb ($\mu_{steady} = 0.494 \rightarrow 0.565 \rightarrow 0.627$), with statistically significant pairwise differences (one-way ANOVA, $p < 10^{-3}$). Hardness remained essentially constant (about 51–52 HRC). The fragment area fraction roughly doubled when 0.5 wt % Nb was added (15 % $\rightarrow$ 29 %) and the continuous-track area fraction dropped from 55 % to 43 %. A linear regression $\mu_{steady} = 0.133 \cdot \text{wt\% Nb} + 0.495$ ($R^2 = 0.999$; $p = 0.022$) summarised the trend. The Pearson correlation between μ_{steady} and the continuous-track area fraction was -0.82 . Combining the microstructural evidence reported by MELO (2018) and the tribological evidence obtained here, we propose that the dominant wear mechanism shifts from adhesive/abrasive to delamination with third-body formation, which explains the increase in friction without a corresponding hardness change.

Keywords: Sliding wear. High-chromium white cast iron. Niobium. Pin-on-disk. Image segmentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do ensaio pino-sobre-disco.	21
Figura 2 – Imagens de microscopia óptica (a) e segmentações por processamento de imagem: segmentação completa (b), máscara de fragmentos (c) e máscara da pista contínua (d)	24
Figura 3 – Mosaico de micrografias ópticas das três amostras (linhas) em três magnificações (colunas).	26
Figura 4 – Dureza Rockwell C média $\pm$ DP por amostra.	27
Figura 5 – Evolução temporal do coeficiente de atrito para as três amostras.	28
Figura 6 – Boxplot do coeficiente de atrito no regime 1 (0–15 s).	29
Figura 7 – Boxplot do coeficiente de atrito no regime 2 (15 s–10 min).	30
Figura 8 – Regressão linear de μ_{R2} versus teor de Nb.	31
Figura 9 – Fração de área de fragmentos (FRAG) por amostra.	32
Figura 10 – Tamanho médio dos fragmentos por imagem.	33
Figura 11 – Fração de área da pista contínua (PISTA) por amostra.	34
Figura 12 – Circularidade dos fragmentos por amostra.	35
Figura 13 – Distribuição do tamanho médio do fragmento.	35
Figura 14 – μ_{R2} versus %Área de fragmentos (médias por amostra; $n = 3$).	36
Figura 15 – μ_{R2} versus tamanho médio do fragmento ($n = 3$).	37
Figura 16 – Fluxograma mecanismo de desgaste.	38
Figura 17 – Imagens representativas da pista e da segmentação (linhas: amostras; colunas: original, FRAG, PISTA).	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das três ligas (% em peso).	22
Tabela 2 – Parâmetros do ensaio pino-sobre-disco.	23
Tabela 3 – Métricas extraídas pelo ImageJ para cada classe segmentada.	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (análise de variância)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COF	<i>Coefficient of Friction</i> (coeficiente de atrito)
DP	Desvio padrão
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
FFAC	Ferro fundido branco alto cromo
FRAG	Classe de fragmentos na segmentação da pista
FVC	Fração volumétrica de carbonetos
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NbC	Carboneto de nióbio
PISTA	Classe da pista contínua na segmentação
Ra	Rugosidade média aritmética
STT	Sem tratamento térmico
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TT	Tratamento térmico
LVDT	Transformador diferencial variável linear
WC-Co	Metal duro: carboneto de tungstênio cementado com cobalto

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância dos testes estatísticos
μ	Coeficiente de atrito
μ_{R1}	Coeficiente de atrito no regime 1 (<i>running-in</i> , 0–15 s)
μ_{R2}	Coeficiente de atrito no regime 2 (estacionário, 15–600 s)
M_7C_3	Carboneto de cromo principal
M_3C	Carboneto secundário (cementita ligada)
NbC	Carboneto de nióbio
R^2	Coeficiente de determinação da regressão
r	Coeficiente de correlação de Pearson
F	Estatística da análise de variância (ANOVA)
p	Probabilidade de significância (<i>p-valor</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Problema de pesquisa	13
1.3	Hipótese	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>14</i>
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>14</i>
1.5	Justificativa	14
1.6	Organização do Texto	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Tribologia	16
2.2	Ferros fundidos	17
2.3	Ferros fundidos brancos alto cromo	18
2.4	Carbonetos M_7C_3, M_3C e NbC	18
2.5	Tratamentos térmicos em FFAC	19
2.6	Desgaste por deslizamento	19
2.7	Ensaio pino-sobre-disco — ASTM G99	20
2.8	Coeficiente de atrito e regimes	21
2.9	Análise de imagens e segmentação	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Materiais	22
3.2	Preparação metalográfica	22
3.3	Caracterização preliminar	22
3.4	Ensaio pino-sobre-disco	23
3.5	Análise da pista de desgaste	23
3.6	Tratamento estatístico	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	Caracterização inicial das amostras	26
4.1.1	<i>Microestrutura</i>	<i>26</i>

4.1.2	<i>Dureza Rockwell C</i>	27
4.2	Coeficiente de atrito nos dois regimes	28
4.2.1	<i>Curvas temporais</i>	28
4.2.2	<i>Regime 1 — running-in</i>	28
4.2.3	<i>Regime 2 — estacionário</i>	29
4.2.4	<i>Regressão μ_{R2} versus %Nb</i>	31
4.3	Análise da pista de desgaste segmentada	32
4.3.1	<i>Fragmentos — fração de área coberta</i>	32
4.3.2	<i>Fragmentos — tamanho médio</i>	33
4.3.3	<i>Pista contínua — fração de área coberta</i>	33
4.3.4	<i>Morfologia dos fragmentos — circularidade</i>	34
4.3.5	<i>Distribuição do tamanho do fragmento</i>	35
4.4	Correlações entre atrito e morfologia da pista	36
4.4.1	<i>μ_{R2} versus %Área de fragmentos</i>	36
4.4.2	<i>μ_{R2} versus tamanho médio do fragmento</i>	36
4.4.3	<i>μ_{R2} versus %Área da pista contínua</i>	37
4.4.4	<i>μ_{R2} versus dureza HRC</i>	37
4.4.5	<i>μ_{R2} versus <i>Ra</i> pré-teste</i>	38
4.5	Mecanismo de desgaste proposto	38
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A – MACRO DE SEGMENTAÇÃO NO IMAGEJ	42
	APÊNDICE B – DATASET CONSOLIDADO	43
	APÊNDICE C – SCRIPT DE ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
	ANEXO A – NORMA ASTM G99	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O ferro fundido branco alto cromo (FFAC) é um dos materiais mais usados em componentes submetidos a desgaste severo na indústria de mineração, cimento, siderurgia e energia. Bombas de polpa, revestimentos de moinhos, britadores, ciclones e palhetas de tubulação são construídos com essa família de ligas porque combinam carbonetos primários de alta dureza — sobretudo o M_7C_3 , com dureza próxima de 1 200 HV — distribuídos em uma matriz austenítica ou martensítica que pode ser ajustada por tratamento térmico (PENAGOS, 2016).

Esses componentes são caros e o seu prazo de troca dita grande parte do custo de manutenção das plantas industriais. Por isso há um esforço contínuo de pesquisa para tornar essas ligas mais resistentes ao desgaste sem aumentar excessivamente o custo da liga. Uma das alternativas mais estudadas nas últimas três décadas é a adição de pequenas quantidades de nióbio (entre 0,5 % e 2 % em peso). O Brasil é o maior produtor mundial de nióbio, o que torna essa rota especialmente atraente do ponto de vista da cadeia de suprimentos.

1.2 Problema de pesquisa

A literatura sobre o nióbio em FFAC concorda em dois pontos. Primeiro, o nióbio forma o carboneto NbC, mais duro (aproximadamente 2 400 HV) e com morfologia mais compacta que o M_7C_3 (HE-XING *et al.*, 1993; FILIPOVIC *et al.*, 2013). Segundo, a adição de Nb refina a microestrutura e desloca a composição efetiva no diagrama Fe-C-Cr para a região hipoeutética, fazendo aparecer dendritas pró-eutéticas de austenita (MELO, 2018). Em ensaios de desgaste abrasivo (ASTM G65), os ganhos de vida útil chegam a cerca de 30 % para 0,5 % de Nb (MELO, 2018).

Permanece em aberto, contudo, a pergunta operacional: em condições de desgaste por deslizamento contra um material muito mais duro (metal duro WC-Co), como esses ganhos microestruturais se traduzem? O coeficiente de atrito, que governa a energia dissipada e o calor gerado no contato, melhora ou piora? E o que acontece com os detritos na pista de desgaste? Sendo assim, este trabalho visa contribuir com algumas análises realizadas nas estruturas dos IFMG de Betim e Ibirité, que foram realizadas com o objetivo de fornecer dados, e comparações entre fragmento e pista.

1.3 Hipótese

Quanto maior o teor de nióbio, mais dendritas pró-eutéticas e carbonetos NbC estarão presentes; em consequência, aumenta o número de interfaces internas (matriz/dendrita, dendrita/NbC, dendrita/ M_7C_3). Sob deslizamento contra um pino de metal duro, essas interfaces podem se tornar pontos de concentração de tensão e de nucleação de microtrincas subsuperfi-

ciais, favorecendo o destacamento de placas de material (delaminação) e a geração de detritos solto entre as superfícies (terceiro corpo). A hipótese de trabalho é, portanto: *o coeficiente de atrito no regime estacionário cresce de forma uniforme com o teor de Nb, mesmo quando a dureza global da liga permanece praticamente constante.*

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo geral*

Correlacionar as métricas geométricas das regiões segmentadas na pista de desgaste com o coeficiente de atrito, para três teores de nióbio (0 %, 0,5 % e 1 % em peso) em ferro fundido branco alto cromo ensaiado em configuração pino-sobre-disco.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Caracterizar quantitativamente o coeficiente de atrito nos dois regimes (*running-in* de 0 a 15 s e estacionário de 15 a 600 s) para cada liga.
2. Quantificar a fração de área e o tamanho médio de fragmentos e da pista contínua de desgaste a partir da segmentação automatizada no ImageJ, com a ferramenta Trainable Weka Segmentation .

Trainable Weka Segmentation: É um plugin do ImageJ/Fiji que usa algoritmos de aprendizado de máquina — especialmente o classificador Random Forest — para segmentar imagens de forma interativa. Em vez de definir manualmente limiares ou filtros, o usuário treina um modelo anotando pequenas regiões da imagem, e o plugin aprende a distinguir as classes automaticamente.
3. Avaliar estatisticamente, por meio de testes *t*, ANOVA e correlações de Pearson, as relações entre o coeficiente de atrito e as métricas microestruturais (dureza, rugosidade) e tribológicas (área e tamanho dos fragmentos, área da pista).
4. Propor um mecanismo de desgaste compatível com o conjunto de evidências obtidas, articulando os dados do coeficiente de atrito, da segmentação e da microestrutura reportada por MELO (2018).

1.5 Justificativa

Do ponto de vista de engenharia, conhecer o efeito do nióbio em um sistema tribológico real (pino-disco) é um passo essencial para a seleção de ligas em aplicações com solicitação combinada de impacto e deslizamento. Do ponto de vista metodológico, este trabalho visa contribuir com os conhecimento tribológicos, do pipeline de segmentação automatizada de pistas, o que

abre caminho para análises mais quantitativas em estudos futuros. Do ponto de vista científico, o experimento contribui para a importancia de se mapear o efeito do nióbio em FFAC.

1.6 Organização do Texto

O texto está organizado em três capítulos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão das ligas, dos mecanismos de desgaste e do ensaio pino-sobre-disco. O Capítulo 3 detalha os materiais, a preparação metalográfica e os procedimentos experimentais. O Capítulo 4 traz os resultados e a discussão integrada, organizados em torno das correlações entre o coeficiente de atrito e as métricas da pista.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne os conceitos que servirão de base à análise dos resultados. As cinco subseções a seguir cobrem, na ordem: o que é um FFAC (Seção 2.3), quais carbonetos aparecem nessas ligas (Seção 2.4), como o tratamento térmico altera a matriz (Seção 2.5), quais mecanismos de desgaste podem atuar em um contato deslizante (Seção 2.6), como o ensaio pino-sobre-disco é executado (Seção 2.7), o que significa o coeficiente de atrito e seus regimes (Seção 2.8) e, finalmente, como a segmentação de imagens permite quantificar a aparência da pista de desgaste (Seção 2.9).

2.1 Tribologia

A tribologia é a ciência e a tecnologia das superfícies em contato relativo sob movimento — abrangendo o estudo da fricção, do desgaste e da lubrificação. O termo foi cunhado e formalmente proposto por JOST (1966) em relatório encomendado pelo governo britânico, que demonstrou o impacto econômico expressivo das perdas associadas ao atrito e ao desgaste na indústria. Desde então, a área se consolidou como disciplina interdisciplinar que integra conhecimentos de mecânica dos sólidos, ciência dos materiais, química de superfícies e engenharia de projeto (HUTCHINGS, 1992).

Do ponto de vista físico, quando duas superfícies se movem uma em relação à outra, as asperezas microscópicas de ambas entram em contato pontual. Nesses pontos de contato real — cuja área somada é muito menor que a área aparente de contato macroscópica — surgem pressões locais elevadas, deformações plásticas, reações químicas e transferência de material. O resultado macroscópico instantâneo é a força de atrito, e o resultado acumulado ao longo do tempo é a perda de material por desgaste (BHUSHAN, 2002).

A quantificação do atrito é feita pelo coeficiente de atrito μ , definido como:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.1)$$

onde F_t é a força tangencial necessária para manter o deslizamento e F_n é a força normal que pressiona as superfícies. O coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca do material, mas uma propriedade do sistema tribológico: depende do par de materiais, da geometria de contato, da velocidade de deslizamento, da temperatura, do ambiente e da presença de lubrificante ou de partículas entre as superfícies (HUTCHINGS, 1992). Valores típicos para contato seco metal-metal situam-se entre 0,3 e 0,8, podendo exceder 1,0 em condições de adesão severa (BHUSHAN, 2002).

O desgaste, por sua vez, é quantificado pela perda de massa ou volume de material ao longo de uma distância ou tempo de deslizamento. A norma AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM (2017), adotada neste trabalho, padroniza o ensaio pino-

sobre-disco para medir simultaneamente o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste em condições controladas de carga, velocidade e distância. A tribologia tem papel central na seleção de materiais para componentes sujeitos a desgaste severo, como os estudados neste trabalho.

2.2 Ferros fundidos

Os ferros fundidos são ligas Fe–C com teor de carbono superior a 2,0 % em peso, limite acima do qual a solidificação produz carbono na forma de grafita livre ou de carbonetos, conferindo características microestruturais e mecânicas distintas das dos aços. A elevada fluidez no estado líquido, o baixo ponto de fusão relativo e a boa moldabilidade tornaram os ferros fundidos materiais de ampla aplicação industrial desde o século XVIII, sendo ainda hoje empregados em blocos de motor, tubulações, revestimentos de moinhos e componentes de bombas (DAVIS, 1996).

A classificação dos ferros fundidos baseia-se principalmente na forma como o carbono se apresenta na microestrutura solidificada. No ferro fundido cinzento, o carbono precipita como grafita lamelar, conferindo boa usinabilidade e capacidade de amortecimento de vibrações, porém baixa resistência à tração. No ferro fundido nodular (ou dútil), tratamentos com magnésio ou cério na panela transformam a grafita em nódulos esféricos, elevando significativamente a tenacidade e a resistência à fadiga. No ferro fundido maleável, um tratamento térmico pós-solidificação converte a cementita em rosetas de grafita, obtendo propriedades intermediárias (STEFANESCU, 2011).

O ferro fundido branco é obtido quando o teor de carbono e a velocidade de resfriamento são tais que todo o carbono permanece combinado quimicamente na forma de carbonetos de ferro (Fe_3C , cementita) e de cromo (M_7C_3), sem precipitação de grafita livre. A ausência de grafita confere dureza e resistência ao desgaste abrasivo muito superiores às dos demais tipos, ao custo de baixa tenacidade e praticamente nula usinabilidade convencional. Por essa razão, peças de ferro fundido branco são fabricadas já na forma final por fundição e destinadas a aplicações onde o desgaste abrasivo é o mecanismo de falha dominante, como revestimentos de moinhos de bolas, grelhas de britadores, palhetas de bombas de polpa e ciclones na indústria de mineração e cimento (PENAGOS, 2016).

Dentro da família dos ferros fundidos brancos, a adição de cromo em teores acima de 11 % dá origem aos ferros fundidos brancos alto cromo (FFAC), que substituem a cementita metaestável por carbonetos M_7C_3 termodinamicamente mais estáveis e de dureza intrínseca superior. Essa subclasse representa o estado da arte em resistência ao desgaste abrasivo entre os materiais ferrosos e é o foco das demais seções deste capítulo.

2.3 Ferros fundidos brancos alto cromo

Os ferros fundidos brancos alto cromo são ligas Fe-C-Cr com teor de carbono entre 2,0 % e 3,3 %, teor de cromo entre 11 % e 30 % e baixos teores de silício (até 1,5 %) (PENAGOS, 2016). A norma ASTM A532 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014) classifica essas ligas em três grandes grupos (I, II e III) e diversos subtipos. Neste trabalho a referência é a classe III A, alto cromo (23 a 30 %), faixa de carbono 2,0 a 3,3 % e elementos secundários (Mo, Mn, Si) controlados.

A microestrutura típica é formada por carbonetos M_7C_3 de morfologia hexagonal alongada distribuídos em uma matriz austenítica ou martensítica. Quando a composição cai exatamente no ponto eutético, os carbonetos M_7C_3 formam uma rede tridimensional contínua e a matriz preenche os espaços entre eles; quando a composição se afasta do eutético em direção ao lado pobre em carbono (hipoeutético), aparecem dendritas pró-eutéticas de austenita antes do eutético se formar (THORPE; CHICCO, 1985). Essas dendritas representam regiões com fração volumétrica de carbonetos menor que o eutético em torno delas.

Carbonetos M_7C_3 apresentam dureza intrínseca de aproximadamente 1 200 HV. Esse valor é cerca de duas vezes a dureza típica da matriz tratada termicamente (em torno de 600 HV). É essa diferença que confere ao FFAC a sua excelente resistência a desgaste abrasivo: o carboneto resiste à penetração do abrasivo enquanto a matriz, mais tenaz, segura o carboneto. A morfologia, a distribuição e a fração volumétrica dos carbonetos são, portanto, os três parâmetros microestruturais centrais para o comportamento tribológico (ZUM GAHR, 1980).

2.4 Carbonetos M_7C_3 , M_3C e NbC

Três carbonetos aparecem rotineiramente em FFAC, com diferenças importantes entre si:

- M_7C_3 é o carboneto principal nas ligas com Cr acima de 12 %. A sua estrutura cristalina é hexagonal complexa, e o “M” representa principalmente cromo, com pequenas substituições por ferro, manganês ou molibdênio. A dureza típica fica em torno de 1 100 a 1 350 HV (PEREIRA, 2012).
- M_3C (cementita ligada) aparece em pequena quantidade como carboneto secundário, sobretudo em ligas com baixo cromo ou em tratamentos térmicos de longa duração. Possui dureza menor, entre 800 e 1 000 HV.
- NbC é um carboneto formado preferencialmente quando se adiciona nióbio ao banho líquido. Apresenta estrutura cristalina cúbica do tipo NaCl, morfologia compacta ou em forma de gancho, e dureza superior a 2 400 HV (HE-XING *et al.*, 1993).

A formação do NbC compete com a do M_7C_3 pelo carbono dissolvido no banho. Como o NbC se solidifica em temperatura mais elevada, a sua nucleação ocorre primeiro; com isso ele captura carbono da matriz e desloca a composição residual para a região hipoeutética do diagrama Fe-C-Cr. Esse mecanismo explica por que adicionar 0,5 a 1 % de Nb a uma liga inicialmente eutética torna a microestrutura final hipoeutética, fazendo aparecer dendritas pró-eutéticas de austenita (MELO, 2018).

2.5 Tratamentos térmicos em FFAC

Embora o foco deste TCC seja o ensaio mecânico, é importante registrar a condição de tratamento térmico das amostras, pois ela define a matriz da liga. MELO (2018) aplicou nas três ligas o seguinte ciclo:

1. **Recozimento a 700 °C por 2 horas**, para decompor a austenita inicial em ferrita mais carboneto.
2. **Austenitização a 1 000 °C por 5 horas**, para minimizar a austenita retida e elevar a microdureza da matriz.
3. **Têmpera ao ar forçado**, para obter matriz martensítica de alta dureza com baixa fração de austenita retida.
4. **Revenimento a 250 °C por 2 horas**, para reduzir a fragilidade sem alterar significativamente a microestrutura.

Os valores de dureza medidos neste TCC (em torno de 51 HRC) são consistentes com as amostras na condição tratada termicamente (48 a 50 HRC), e não com a condição de bruto de fusão (55 a 56 HRC). Por isso, ao longo do Capítulo 3, trataremos as amostras como tratadas termicamente.

2.6 Desgaste por deslizamento

O termo “desgaste” descreve a remoção progressiva de material de superfícies em contato relativo. Em engenharia, costuma-se dividir os mecanismos em quatro famílias principais (HUTCHINGS, 1992):

- **Adesão:** pontos de contato entre as superfícies criam ligações metálicas instantâneas; o cisalhamento posterior arranca material de uma das superfícies. Domina em metais dúcteis e em lubrificação insuficiente.

- **Abrasão:** partículas duras (rugosidades da contra-superfície ou abrasivo livre) sulcam a superfície. Pode ser por dois corpos (riscamento direto) ou por três corpos (partícula rolante entre as superfícies).
- **Delaminação:** tensões cisalhantes cíclicas geram microtrincas subsuperficiais paralelas à superfície; o crescimento e a coalescência dessas trincas levam ao destacamento de placas finas de material.
- **Tribooxidação:** a temperatura local elevada na zona de contato oxida o metal; a remoção da camada de óxido representa perda contínua de material.

Em sistemas reais é comum a coexistência de dois ou mais mecanismos. A predominância de cada um depende da combinação dureza-tenacidade do par, da carga normal, da velocidade de deslizamento, da temperatura ambiente e da presença de fragmentos solto na interface — o chamado terceiro corpo. O terceiro corpo pode tanto reduzir o atrito (atuando como rolamento) quanto aumentá-lo (engatamento mecânico ou *interlocking*), dependendo do tamanho e da forma das partículas.

2.7 Ensaio pino-sobre-disco — ASTM G99

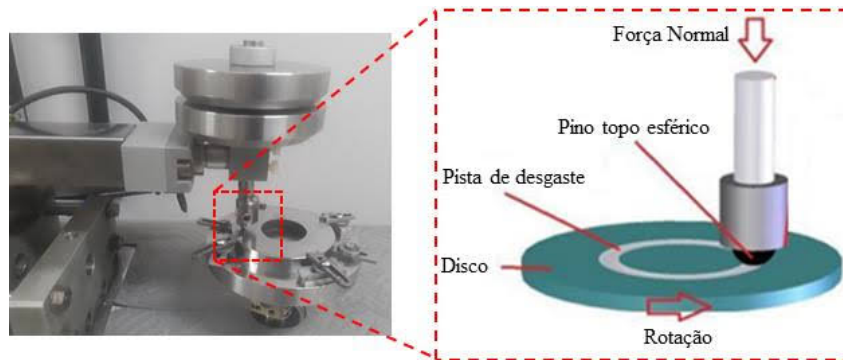
O ensaio pino-sobre-disco é regulamentado pela norma ASTM G99 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, 2017). Nele, um pino estacionário é pressionado contra um disco rotativo com uma carga normal constante. Durante o ensaio, mede-se a força de atrito; a partir dela calcula-se o coeficiente de atrito instantâneo, dado pela razão entre a força tangencial e a força normal. O ensaio também pode incluir transdutores de deslocamento (LVDT), termopares e contagem de revoluções, gerando séries temporais ricas.

Duas fases típicas aparecem na curva $\mu(t)$:

- **Regime de *running-in* (transitório):** os primeiros segundos do ensaio mostram um pico ou uma rápida acomodação do contato — as asperezas iniciais são deformadas plasticamente, há ajuste da área real de contato e oxidações superficiais nativas são removidas. Esse regime depende fortemente do estado inicial da superfície (R_a pré-teste).
- **Regime estacionário:** após a acomodação, μ tende a se estabilizar em torno de um valor médio, com flutuações pequenas. Esse valor reflete o equilíbrio entre os mecanismos de desgaste atuantes.

A escolha do limiar temporal entre os dois regimes é convencional. Neste trabalho adotou-se 15 s, com base na inspeção visual das curvas e em coerência com o tratamento estatístico do orientador na planilha original do ensaio.

Figura 1 – Representação do ensaio pino-sobre-disco.



Fonte: Journal of Experimental and Tecnique Instrumentation, 2020.

2.8 Coeficiente de atrito e regimes

O coeficiente de atrito μ é uma grandeza adimensional definida pela razão entre a força tangencial necessária para manter o movimento relativo e a força normal pressionando as superfícies. Valores próximos de zero indicam baixo atrito (típico de lubrificação fluida); valores na faixa 0,1 a 0,2 são característicos de contatos metálicos lubrificados ou autolubrificantes; valores acima de 0,5 são típicos de contato seco entre metais ferrosos não lubrificados (HUTCHINGS, 1992).

Os valores observados neste TCC, entre 0,18 e 0,63, situam-se dentro da faixa esperada para contato seco metal/metal duro, com variação importante entre o regime 1 e o regime 2. O primeiro corresponde à acomodação inicial das asperezas, com valores menores; o segundo corresponde à interação plena do contato e à geração de detritos, com valores mais elevados.

2.9 Análise de imagens e segmentação

A inspeção visual de uma pista de desgaste fornece indicações qualitativas sobre o mecanismo dominante — estrias sugerem abrasão, placas destacadas sugerem delaminação e transferência homogênea sugere adesão —, mas a quantificação dessas características exige processamento de imagem. Para isso, utilizou-se o *software* ImageJ com a ferramenta *Trainable Weka Segmentation*, que emprega aprendizado supervisionado para classificar automaticamente cada pixel em classes definidas pelo usuário a partir de exemplos anotados manualmente. Foram adotadas duas classes: FRAG, correspondente aos fragmentos visíveis sobre a pista (detritos destacados, partículas de óxido e material deslocado), e PISTA, correspondente à área de contato contínua (região aderente, transferida ou compactada). Para cada classe, o ImageJ extraiu métricas geométricas como área total, percentual de área, tamanho médio das regiões conectadas, circularidade e diâmetro de Feret, adotando-se o fator de calibração de 0,45 pixel/ μm (0,2025 $\mu\text{m}^2/\text{pixel}^2$) informado nas planilhas do orientador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As três ligas estudadas passaram por processos de tratamento térmico por MELO (2018) no campus de Betim e Ibirité do IFMG em forno de indução de média frequência (Inductotherm, 25 kg), a partir de pedaços de rotor de bomba de polpa de mineração (FFAC ASTM A532 III A) com adição controlada de ferro-nióbio comercial (66,17 % Nb, granulometria média 19,73 μm após britagem e moagem). A eficiência de incorporação do nióbio no banho foi superior a 90 % (MELO, 2018).

Após o vazamento, três ligas foram obtidas e identificadas como FFCr0%Nb, FFCr0,5%Nb e FFCr1%Nb. As composições químicas, medidas por espectrometria de emissão óptica (SPECTROMAXx, SENAI/CETEF Itaúna), são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química das três ligas (% em peso).

Liga	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S	Nb	Fe
FFCr0%Nb	2,892	1,622	0,572	0,519	26,626	0,027	0,088	0,032	0,006	0,063	67,325
FFCr0,5%Nb	2,844	1,405	0,566	0,498	26,172	0,025	0,098	0,032	0,007	0,476	67,629
FFCr1%Nb	2,743	1,216	0,460	0,488	25,954	0,025	0,106	0,034	0,007	1,014	67,695
ASTM A532 III A (faixa)	2,0–3,3	≤1,5	≤2,0	—	23–30	≤3,0	≤1,2	≤0,1	≤0,06	—	bal.

Fonte: MELO (2018).

Todas as composições estão dentro da especificação da norma ASTM A532 III A. O baixo teor de Nb na liga “0 %” (0,063 %) é explicado pelo aproveitamento de matéria-prima reciclada do rotor, que continha um residual de Nb; o valor foi mantido para preservar a comparação relativa entre as três condições.

As amostras passaram pelo ciclo de tratamento térmico descrito na Seção 2.5 (recozimento, austenitização, têmpera e revenimento). Após o tratamento térmico, foram retificadas em retificadora plana tangencial para o ensaio de desgaste.

3.2 Preparação metalográfica

Para a microscopia óptica utilizada neste TCC, as amostras foram embutidas a quente em baquelite (Arotec PRE 30Mi), lixadas na sequência 80, 120, 220, 320, 400 e 600 mesh, polidas com pasta de diamante de 9, 3 e 1 μm , e atacadas por 5 a 20 segundos com reativo Vilella (1 g de ácido pícrico, 5 mL de ácido clorídrico e 100 mL de álcool etílico P.A.).

3.3 Caracterização preliminar

- **Microscopia óptica:** microscópio metalográfico de platina invertida Fortel IM713, magnificações de 100 $\times$, 200 $\times$ e 400 $\times$. Foram capturadas em torno de 110 imagens por amostra, totalizando aproximadamente 337 micrografias.

- **Dureza Rockwell C:** durômetro IGV modelo RM401/A. Foram realizadas oito medições por amostra, com pré-carga de 10 kgf por 10 segundos e carga plena por 30 segundos, conforme ABNT NBR NM ISO 6508-1.
- **Rugosidade Ra:** quatro medições por amostra antes do ensaio de desgaste, em rugosímetro de bancada.

3.4 Ensaio pino-sobre-disco

O ensaio foi realizado conforme ASTM G99 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, 2017). O contracorpo foi um pino de metal duro (WC-Co) de 6 mm de diâmetro, com geometria esférica de ponta. O disco foram as ligas extraídas do motor de pola, em superfície retificada. Registro também que analisamos apenas uma amostra de cada liga. A Tabela 2 resume os parâmetros utilizados.

Tabela 2 – Parâmetros do ensaio pino-sobre-disco.

Parâmetro	Valor
Carga normal	aproximadamente 20 N
Duração total	600 s (10 minutos)
Variáveis registradas	tempo, distância, revoluções, força, COF, LVDT, temperatura
Pontos por amostra (regime 1)	29
Pontos por amostra (regime 2)	1 102
Pino	metal duro (WC-Co), Ø 6 mm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

- **Nº Amostra 0%Nb:** 1
- **Nº Amostra 0,5%Nb:** 1
- **Nº Amostra 0,5%Nb:** 1

Os dados brutos foram exportados em formato CSV (arquivos #1.csv, #2.csv e #3.csv) e tratados em planilha eletrônica e em Python. Os dois regimes de atrito foram definidos por inspeção visual das curvas: regime 1 de 0 a 15 s (*running-in*) e regime 2 de 15 a 600 s (estacionário).

3.5 Análise da pista de desgaste

Após o ensaio, foram registradas 43 imagens da pista de desgaste, distribuídas entre as três amostras de acordo com o seguinte mapeamento:

- Imagens 1 a 15 → liga FFCr0%Nb (15 imagens).
- Imagens 16 a 30 → liga FFCr0,5%Nb (15 imagens).

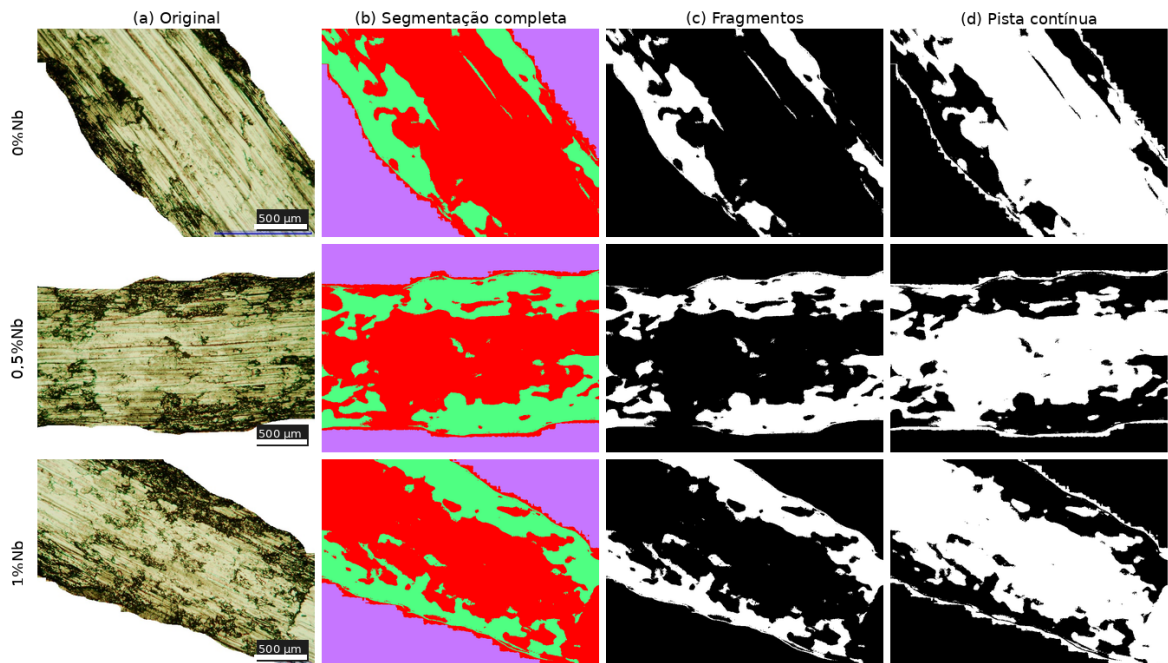
- Imagens 31 a 43 → liga FFCr1%Nb (13 imagens).

Esse mapeamento foi confirmado na planilha de compilação: 1 - Áreas compliadas, tamanho compilados.xls, que também informa o fator de calibração espacial 0,45 pixel/ μm , equivalente a 0,2025 μm^2 por pixel². A calibração deve ser conferida na versão final usando uma barra de escala registrada no próprio microscópio.

A segmentação foi realizada no ImageJ, utilizando o classificador supervisionado *Trainable Weka Segmentation*. As classes foram FRAG (fragmentos) e PISTA (pista contínua), com limiares de 150 a 160 e 70 a 100, respectivamente. Para cada imagem foram geradas três variantes:

- N- SEG.tif — imagem completa rotulada;
- N- SEG - FRAG.tif — máscara binária dos fragmentos;
- N- SEG - PISTA.tif — máscara binária da pista contínua.

Figura 2 – Imagens de microscopia óptica (a) e segmentações por processamento de imagem: segmentação completa (b), máscara de fragmentos (c) e máscara da pista contínua (d)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 3 – Métricas extraídas pelo ImageJ para cada classe segmentada.

Categoria	Métricas
Área e intensidade	Area, %Area, Mean, Mode, IntDen, Median
Geometria e forma	Perimeter, Major, Minor, Angle, Circularity, Solidity
Diâmetro de Feret	Feret, FeretX, FeretY, FeretAngle, MinFeret

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.6 Tratamento estatístico

A análise estatística foi conduzida em duas plataformas independentes para garantir reprodutibilidade: o Microsoft Excel e o Python 3.10 com as bibliotecas pandas, numpy, scipy e statsmodels

Os testes aplicados foram:

- **Teste t pareado** para variáveis com pareamento natural (mesma posição na série temporal de COF para diferentes amostras): COF R1, COF R2 e dureza.
- **Teste t independente com correção de Welch** para variáveis sem pareamento (métricas por imagem): %Area FRAG, Tamanho FRAG.
- **ANOVA *one-way*** para comparação simultânea das três amostras, em todas as variáveis. Em palavras simples, a ANOVA testa se pelo menos uma das médias é diferente das demais.
- **Correlação de Pearson Linear** entre as variáveis em nível de amostra.
- **Regressão linear simples** $\mu_{R2} = a \cdot \%Nb + b$, com intervalo de confiança de 95 %.

O nível de significância adotado foi $\alpha = 0,05$ em todos os testes. Em palavras, um p -valor menor que 0,05 indica que a diferença observada provavelmente não é fruto do acaso.

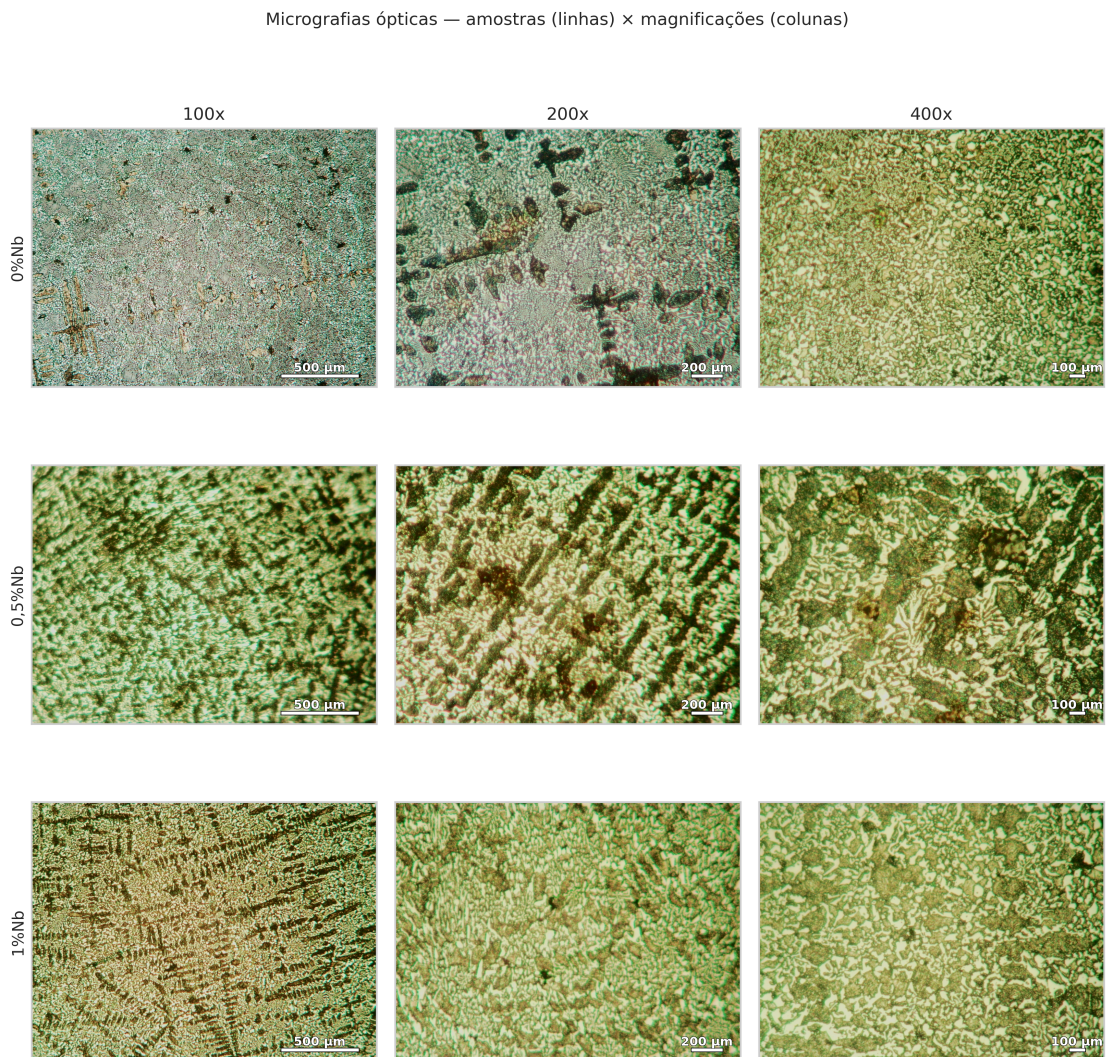
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização inicial das amostras

4.1.1 *Microestrutura*

A Figura 3 apresenta um mosaico de micrografias ópticas das três amostras. A análise visual qualitativa revela uma evolução clara: na liga 0 % Nb a microestrutura é predominantemente eutética, com a rede de carbonetos M_7C_3 formando uma malha quase contínua e poucas regiões livres de carboneto; nas ligas 0,5 % e 1 % Nb, em contraste, aparecem regiões claras irregulares — as dendritas pró-eutéticas de austenita — circundadas por regiões com fração maior de carbonetos eutéticos.

Figura 3 – Mosaico de micrografias ópticas das três amostras (linhas) em três magnificações (colunas).



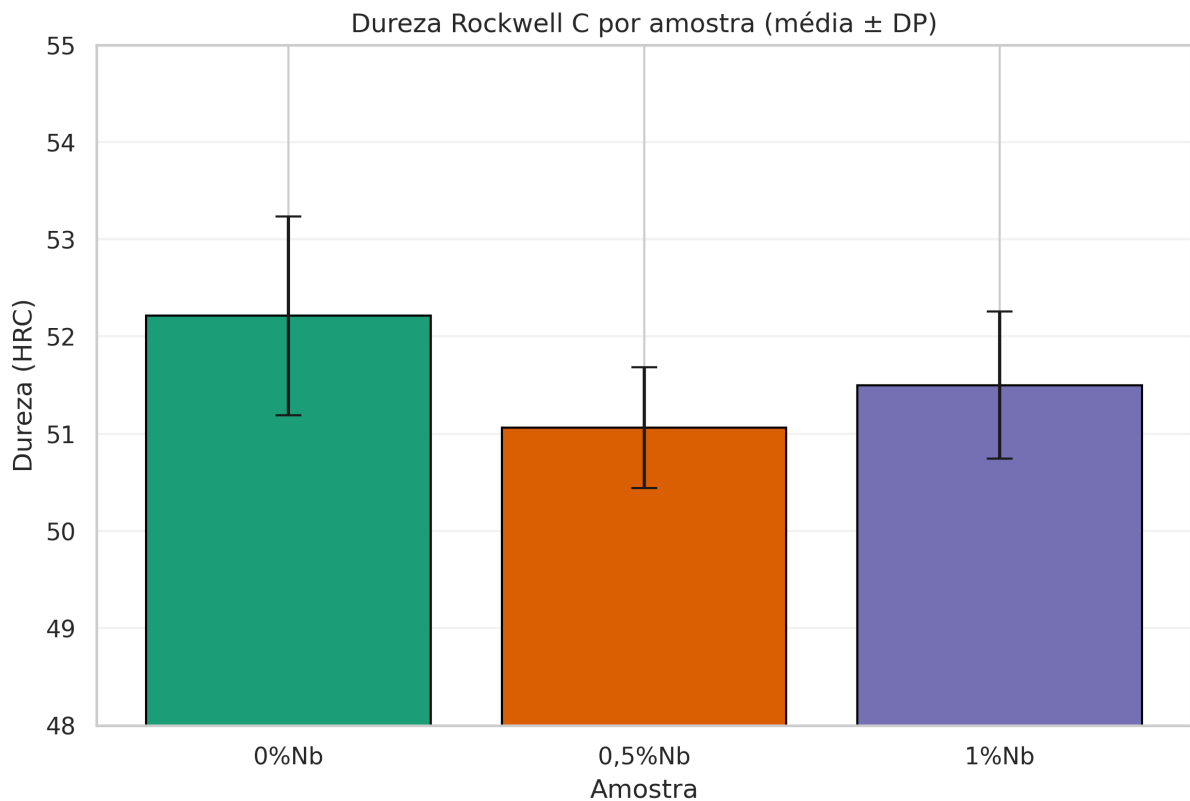
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Essa transição visual concorda com os dados de fração volumétrica de carbonetos (FVC) reportados por MELO (2018): 33,3 % (0 % Nb), 28,1 % (0,5 % Nb) e 24,9 % (1 % Nb), ou seja, uma redução de quase um terço da fração de carbonetos com a adição de 1 % de Nb. O significado físico é direto: o nióbio captura parte do carbono do banho para formar NbC, e o carbono “subtraído” deixa de estar disponível para formar M_7C_3 ; o resultado é a perda da rede eutética, com surgimento das dendritas pró-eutéticas e aumento das interfaces internas do material.

4.1.2 Dureza Rockwell C

A Figura 4 mostra a dureza HRC média por amostra, com barras de desvio padrão. Os valores médios são $52,21 \pm 1,02$ (0 % Nb); $51,06 \pm 0,62$ (0,5 % Nb); e $51,50 \pm 0,76$ (1 % Nb).

Figura 4 – Dureza Rockwell C média $\pm$ DP por amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A ANOVA detecta diferença estatisticamente significativa entre as três médias ($p = 0,033$). A variação total entre as três amostras é menor que 2 HRC, ou seja, menor que o desvio padrão da própria medição. Em termos práticos, a dureza pode ser considerada constante: o nióbio nesta faixa não alterou de maneira relevante a dureza global da liga tratada termicamente.

Esse achado é coerente com o reportado por MELO (2018): a ANOVA da dureza das ligas tratadas termicamente forneceu $p = 0,354$ (não significativa). A explicação microestrutural, dada pelo mesmo autor, é que a redução da microdureza dos carbonetos M_7C_3 (que ocorre

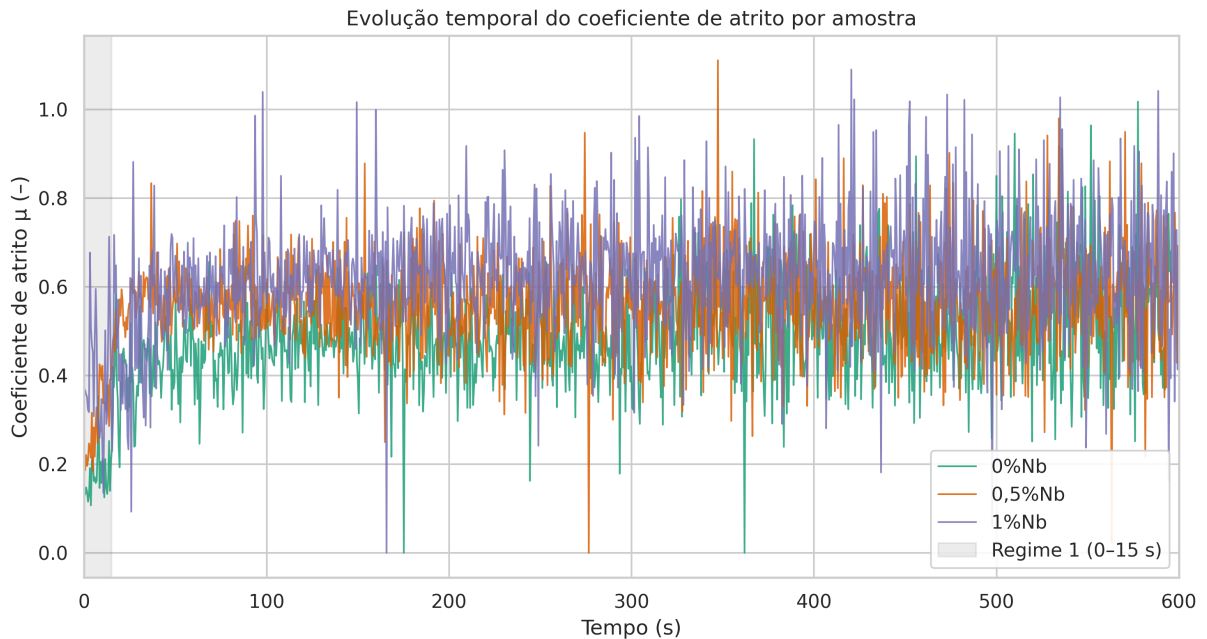
porque o Nb captura parte do carbono e empobrece o M_7C_3) é compensada pela presença dos carbonetos NbC (aproximadamente 2 400 HV), de modo que a dureza global medida em escala macroscópica permanece praticamente invariante.

4.2 Coeficiente de atrito nos dois regimes

4.2.1 Curvas temporais

A Figura 5 traz as séries temporais completas do coeficiente de atrito para as três amostras. A região sombreada nos primeiros 15 segundos identifica o regime 1 (*running-in*). Em todas as três curvas observa-se um aumento rápido de μ nos primeiros segundos seguido de uma estabilização — comportamento clássico previsto pela norma ASTM G99 e por HUTCHINGS (1992). O patamar final do regime estacionário fica visivelmente mais alto à medida que aumenta o teor de Nb.

Figura 5 – Evolução temporal do coeficiente de atrito para as três amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

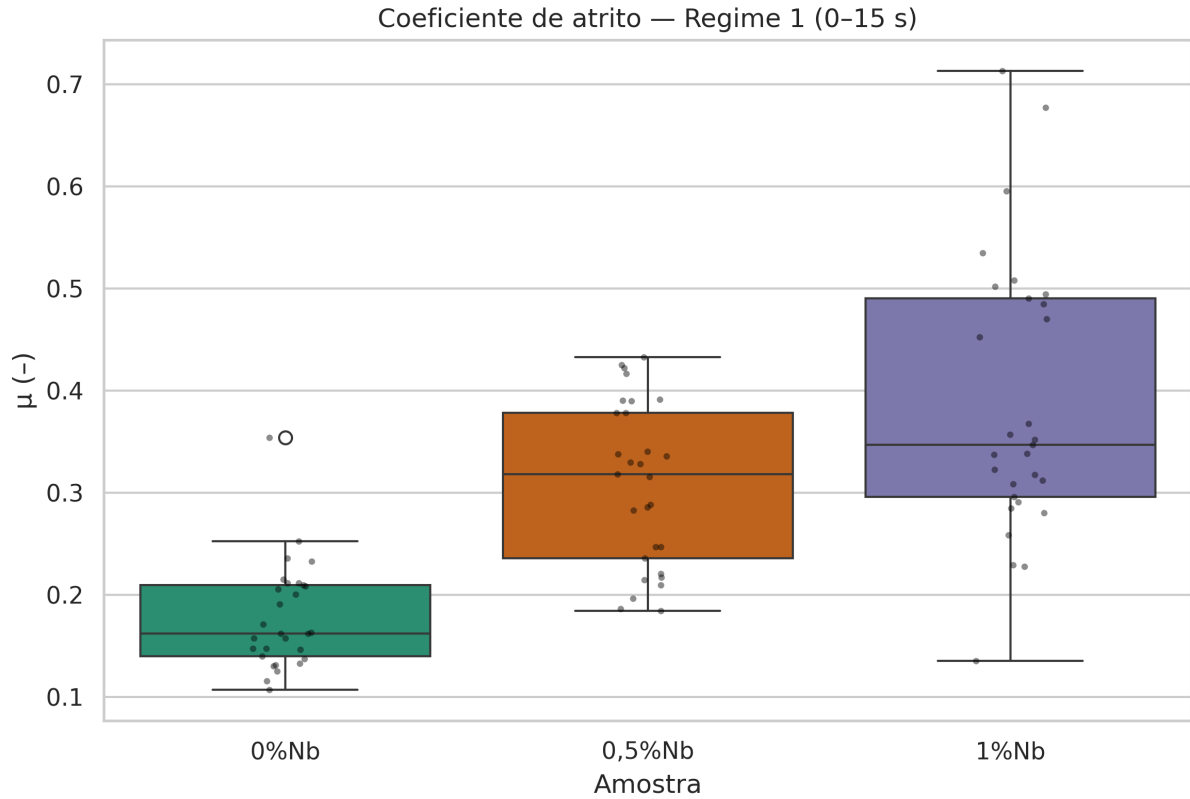
4.2.2 Regime 1 — *running-in*

A Figura 6 apresenta o boxplot m boxplot que é um gráfico que resume a distribuição de um conjunto de dados mostrando sua mediana, quartis e possíveis desvios em uma única figura compacta do COF no regime 1. Os valores médios (29 pontos por amostra) são:

- 0 % Nb: $\mu = 0,178 \pm 0,002$;
- 0,5 % Nb: $\mu = 0,308 \pm 0,006$;

- 1 % Nb: $\mu = 0,389 \pm 0,018$.

Figura 6 – Boxplot do coeficiente de atrito no regime 1 (0–15 s).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A ANOVA fornece $F = 35,4$ e $p < 10^{-10}$, indicando diferença altamente significativa. A diferença máxima — entre 0 % e 1 % Nb — corresponde a um aumento de cerca de 119 % do COF no *running-in*.

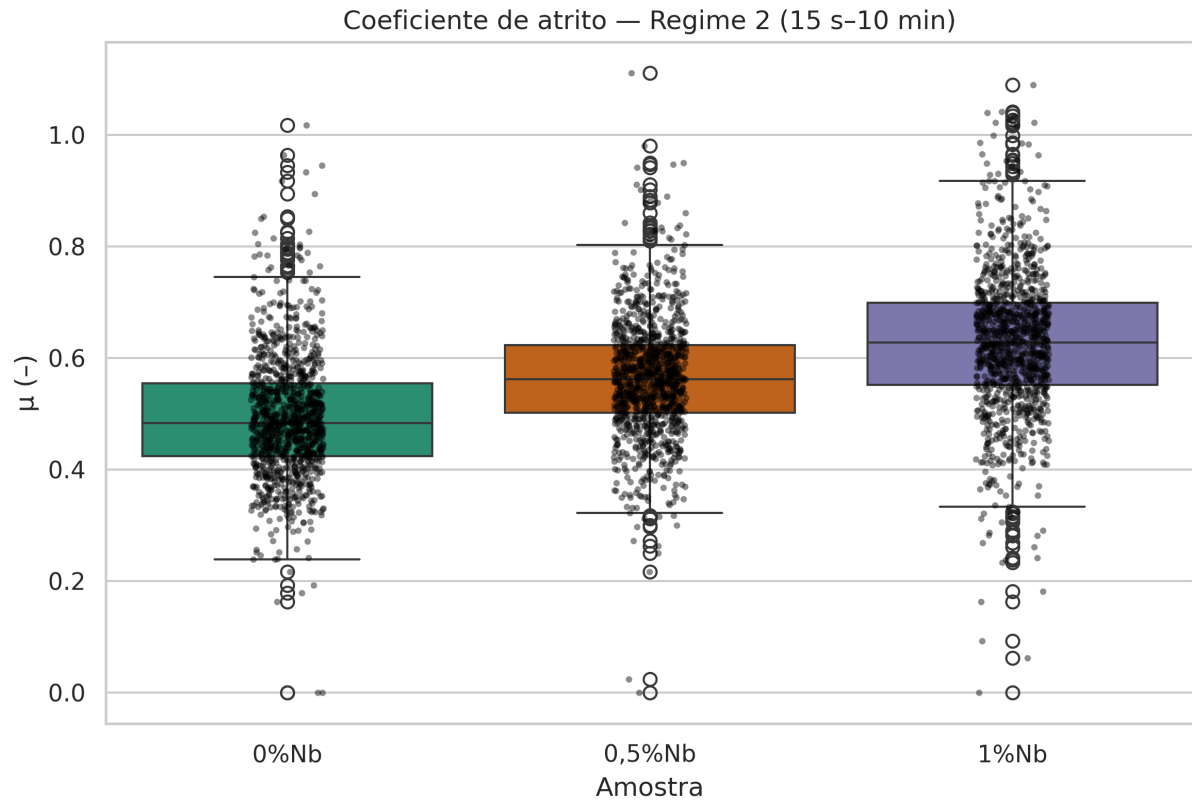
A interpretação física é a seguinte: o *running-in* é o período em que as asperezas iniciais do disco são deformadas, oxidadas e parcialmente removidas até que se estabeleça uma área real de contato consistente. Em amostras com mais dendritas pró-eutéticas e mais carbonetos NbC, há maior diversidade de fases interagindo com o pino. A acomodação inicial é mais “ruidosa”, gera mais detritos, e μ se torna mais alto já neste regime.

4.2.3 Regime 2 — estacionário

A Figura 7 apresenta o boxplot do COF no regime 2 (1 102 pontos por amostra):

- 0 % Nb: $\mu = 0,494 \pm 0,012$;
- 0,5 % Nb: $\mu = 0,565 \pm 0,012$;
- 1 % Nb: $\mu = 0,627 \pm 0,170$.

Figura 7 – Boxplot do coeficiente de atrito no regime 2 (15 s–10 min).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

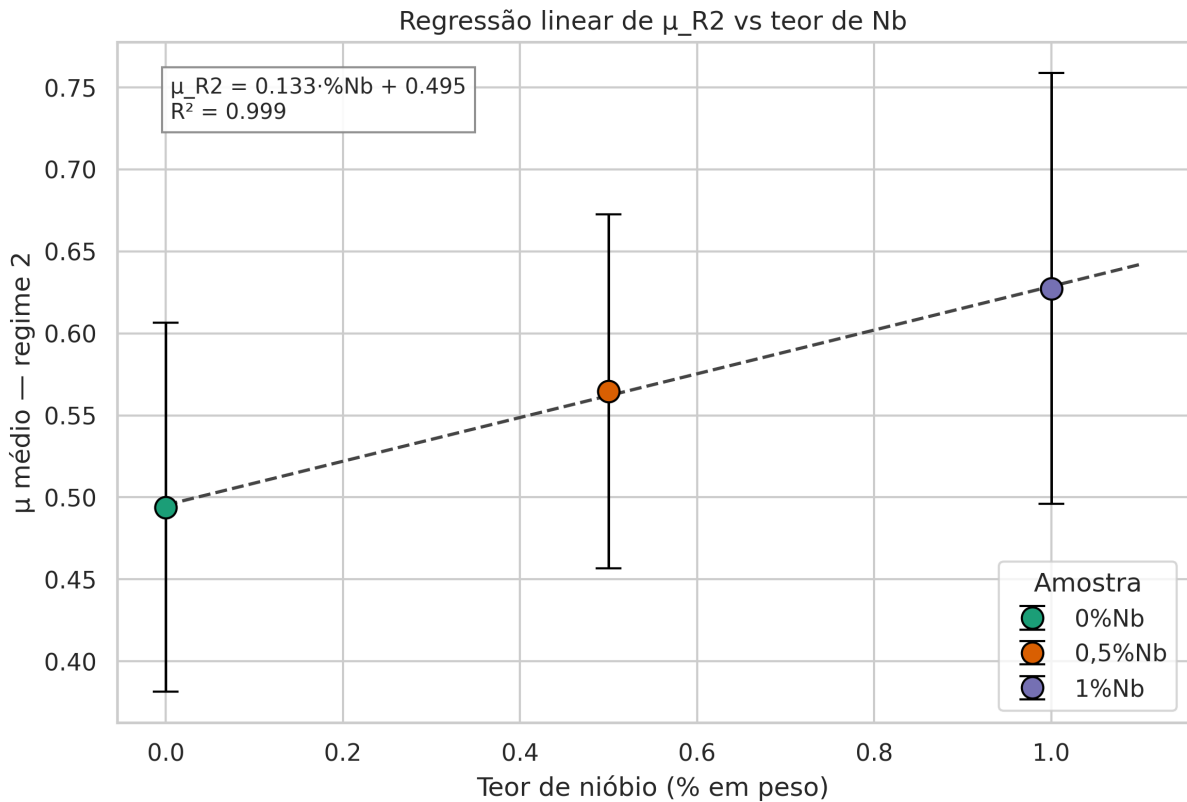
A ANOVA fornece $F = 354,6$ e $p < 10^{-30}$, indicando diferença extremamente significativa. O desvio padrão da amostra de 1 % Nb (0,170) é cerca de 14 vezes maior que o das outras duas (0,012). Esse é um sinal de que a interação entre o pino e essa amostra é mais instável, com flutuações grandes na curva $\mu(t)$. O comportamento é compatível com uma microestrutura mais heterogênea (mais dendritas e mais NbC), que produz episódios alternados de adesão, destacamento e arrasto de detritos.

4.2.4 Regressão μ_{R2} versus %Nb

A Figura 8 mostra a regressão linear simples do μ médio no regime 2 contra o teor de Nb:

$$\mu_{R2} = 0,133 \cdot \%Nb + 0,495 \quad (R^2 = 0,999; p = 0,022) \quad (4.1)$$

Figura 8 – Regressão linear de μ_{R2} versus teor de Nb.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O $R^2 = 0,999$ indica ajuste praticamente perfeito da reta aos três pontos. O intervalo de confiança de 95 % do coeficiente angular é [0,076; 0,191], excluindo o zero. Em palavras simples: dentro da faixa estudada, cada 0,1 % adicional de nióbio na liga aumenta o coeficiente de atrito no regime estacionário em aproximadamente 0,013 unidades.

Cabe um cuidado importante na interpretação: com apenas três pontos, a regressão é matematicamente robusta (a relação é uniforme) mas estatisticamente o $n = 3$ limita o poder do teste. A extrapolação para teores de Nb fora da faixa 0 a 1 % não está justificada por estes dados.

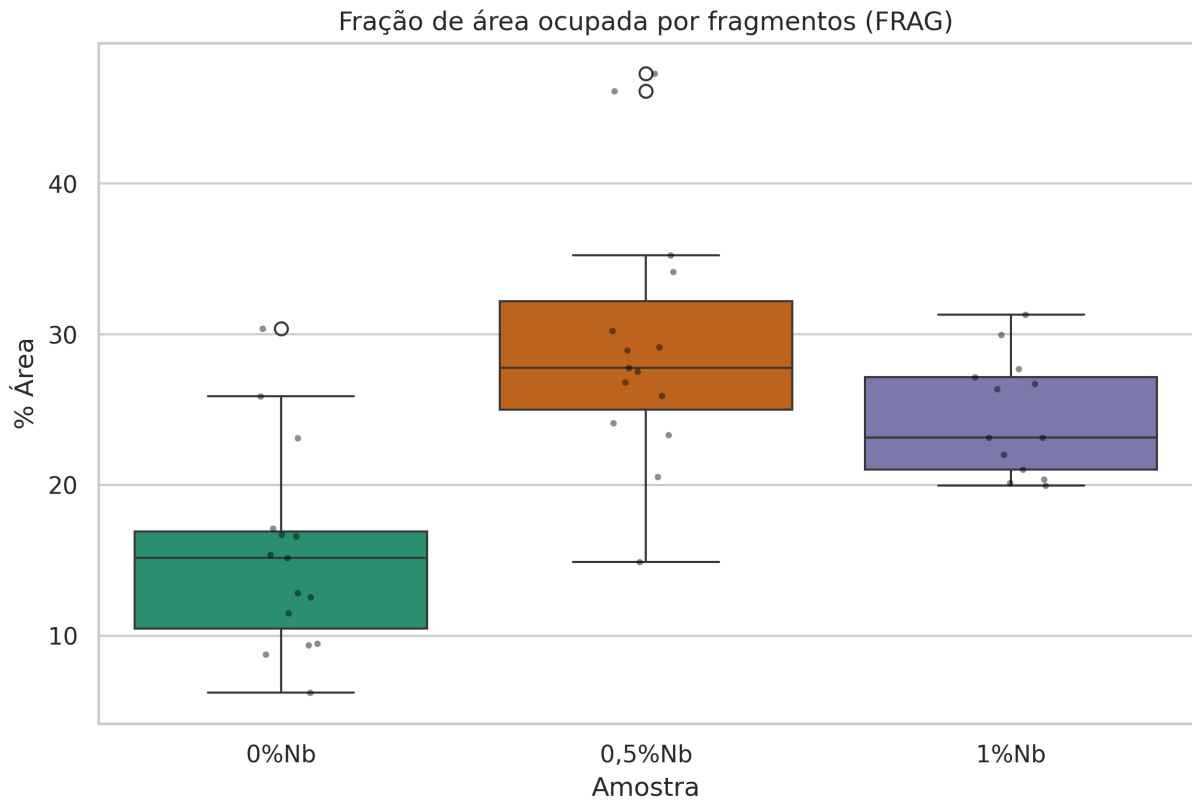
4.3 Análise da pista de desgaste segmentada

4.3.1 Fragmentos — fração de área coberta

A Figura 9 mostra a fração da imagem da pista classificada como fragmentos (classe FRAG). Os valores são:

- 0 % Nb: $15,4 \pm 6,7$ %;
- 0,5 % Nb: $29,5 \pm 8,6$ %;
- 1 % Nb: $24,5 \pm 3,9$ %.

Figura 9 – Fração de área de fragmentos (FRAG) por amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

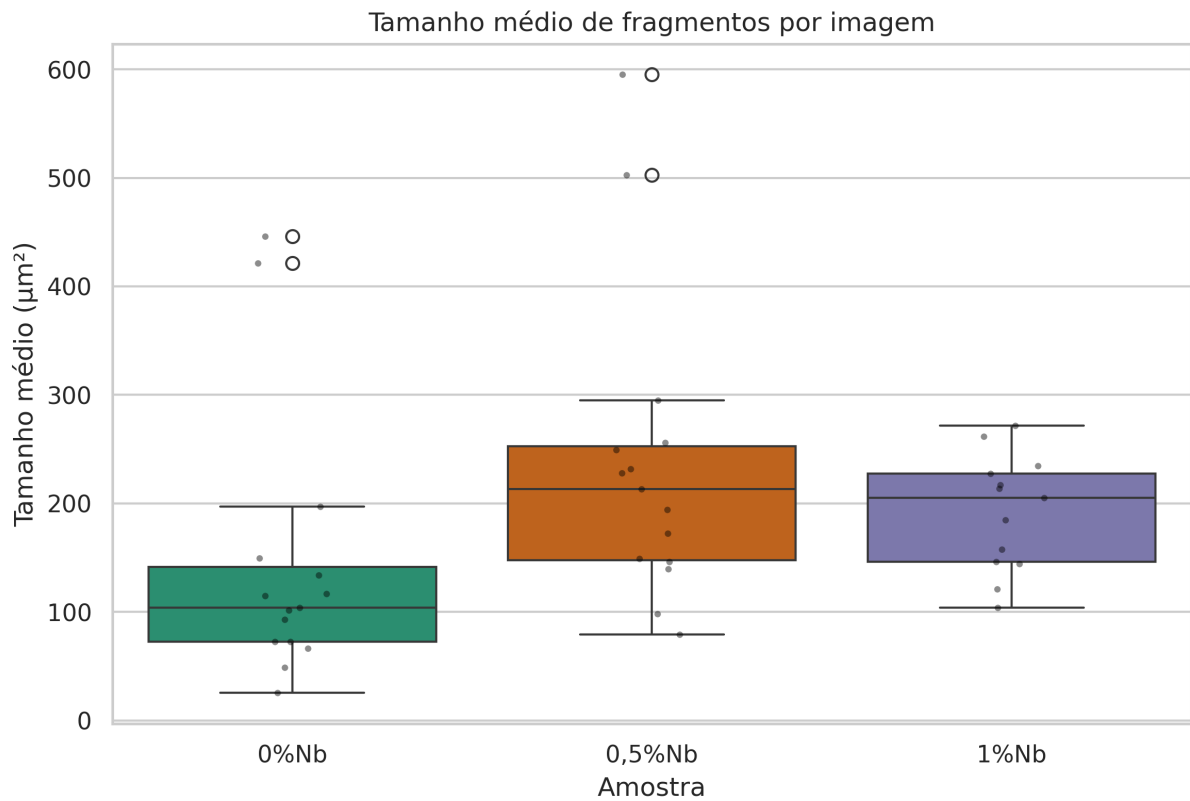
A ANOVA detecta diferença muito significativa ($F = 16,5$; $p \approx 6 \times 10^{-6}$). A fração de fragmentos dobrou ao se adicionar 0,5 % de Nb e permaneceu nesse patamar com 1 % de Nb. Esse comportamento não é monotônico com o teor de Nb (atinge um pico em 0,5 %), em contraste com o comportamento monotônico do COF. A implicação dessa diferença é discutida na Seção 4.5.

4.3.2 Fragmentos — tamanho médio

A Figura 10 apresenta o tamanho médio do fragmento por imagem (em μm^2):

- 0 % Nb: 144 ± 125 ;
- 0,5 % Nb: 237 ± 141 ;
- 1 % Nb: 192 ± 53 .

Figura 10 – Tamanho médio dos fragmentos por imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A ANOVA não detecta diferença estatisticamente significativa ($F = 2,4$; $p = 0,10$), embora a média do tamanho cresça quando o Nb é adicionado. O desvio padrão da amostra de 0 % Nb é particularmente alto, indicando heterogeneidade alta entre as 15 imagens da pista.

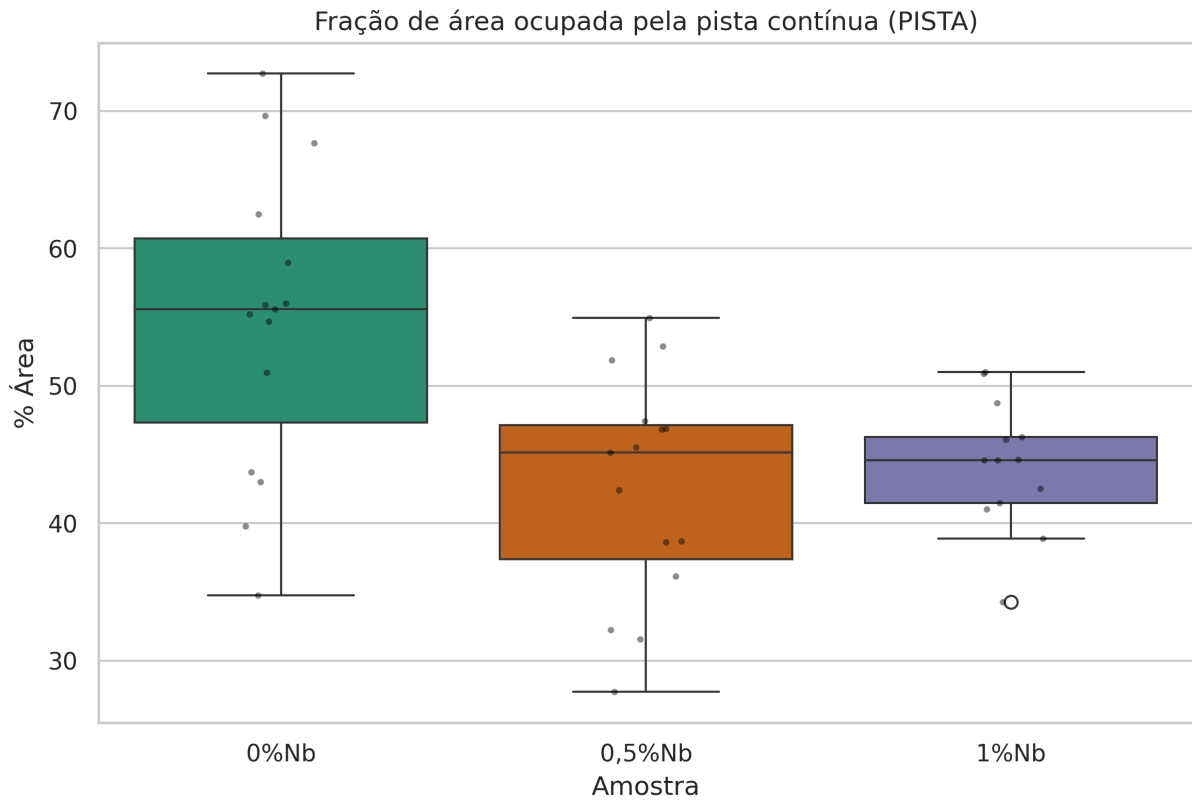
4.3.3 Pista contínua — fração de área coberta

A Figura 11 apresenta a fração da imagem classificada como pista contínua (classe PISTA):

- 0 % Nb: $54,7 \pm 11,0$ %;

- 0,5 % Nb: $42,6 \pm 8,2$ %;
- 1 % Nb: $44,2 \pm 4,7$ %.

Figura 11 – Fração de área da pista contínua (PISTA) por amostra.



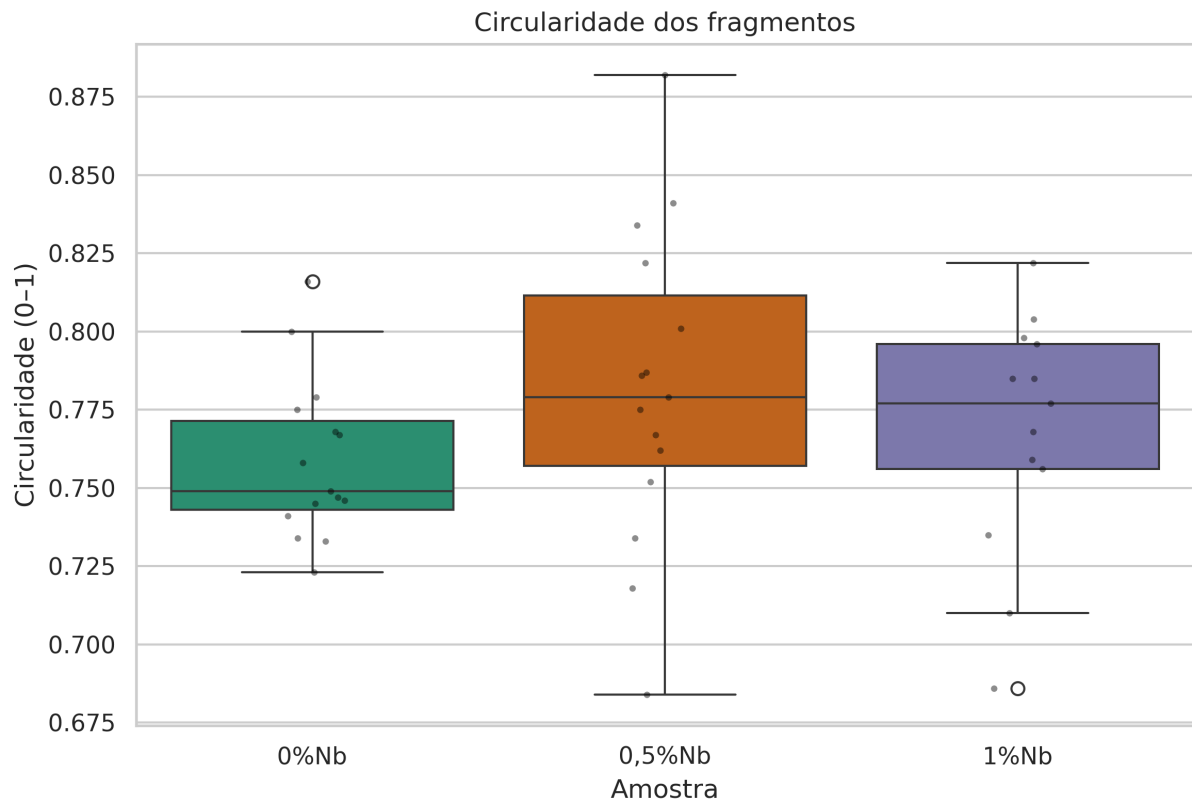
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A ANOVA detecta diferença significativa ($F = 8,86$; $p = 0,0007$). Esses dois resultados são complementares: enquanto a fração de fragmentos cresce com a adição de Nb, a fração de pista contínua cai. Em outras palavras, a estrutura visual da pista se torna mais “fragmentada” e menos “compacta” nas amostras com nióbio.

4.3.4 Morfologia dos fragmentos — circularidade

A Figura 12 mostra a circularidade média dos fragmentos por imagem. Os valores são 0,76 (0 % Nb), 0,78 (0,5 % Nb) e 0,77 (1 % Nb). A ANOVA não detectou diferença significativa ($F = 1,26$; $p = 0,29$). Em palavras simples: a forma média dos fragmentos é a mesma nas três amostras — eles são moderadamente arredondados, mas não círculos perfeitos. A morfologia não é o que muda; o que muda é a quantidade e o tamanho médio.

Figura 12 – Circularidade dos fragmentos por amostra.

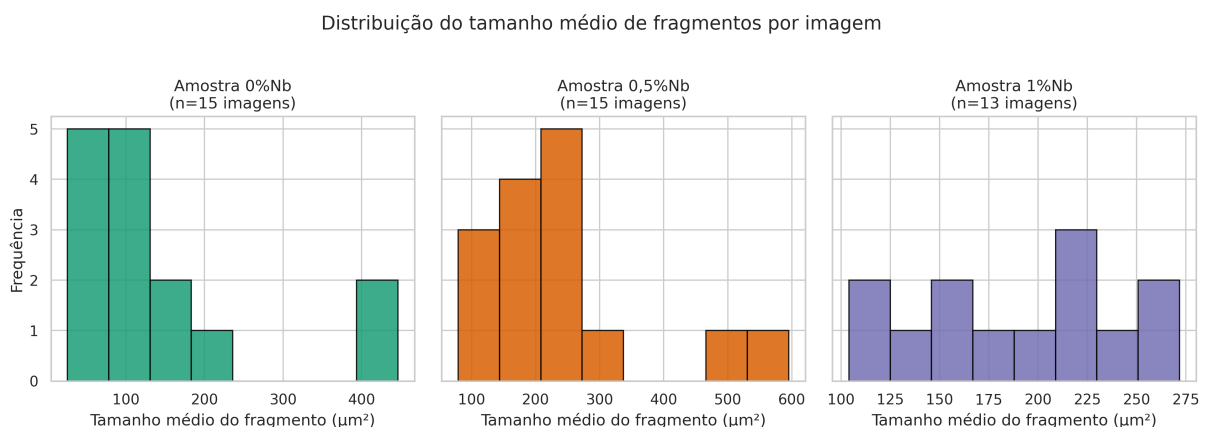


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.3.5 Distribuição do tamanho do fragmento

A Figura 13 apresenta os histogramas do tamanho médio do fragmento por imagem, separados por amostra. Visualmente, observa-se que as amostras com nióbio têm a distribuição deslocada para tamanhos maiores; a amostra 0 % Nb concentra a maior parte das imagens em fragmentos pequenos.

Figura 13 – Distribuição do tamanho médio do fragmento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

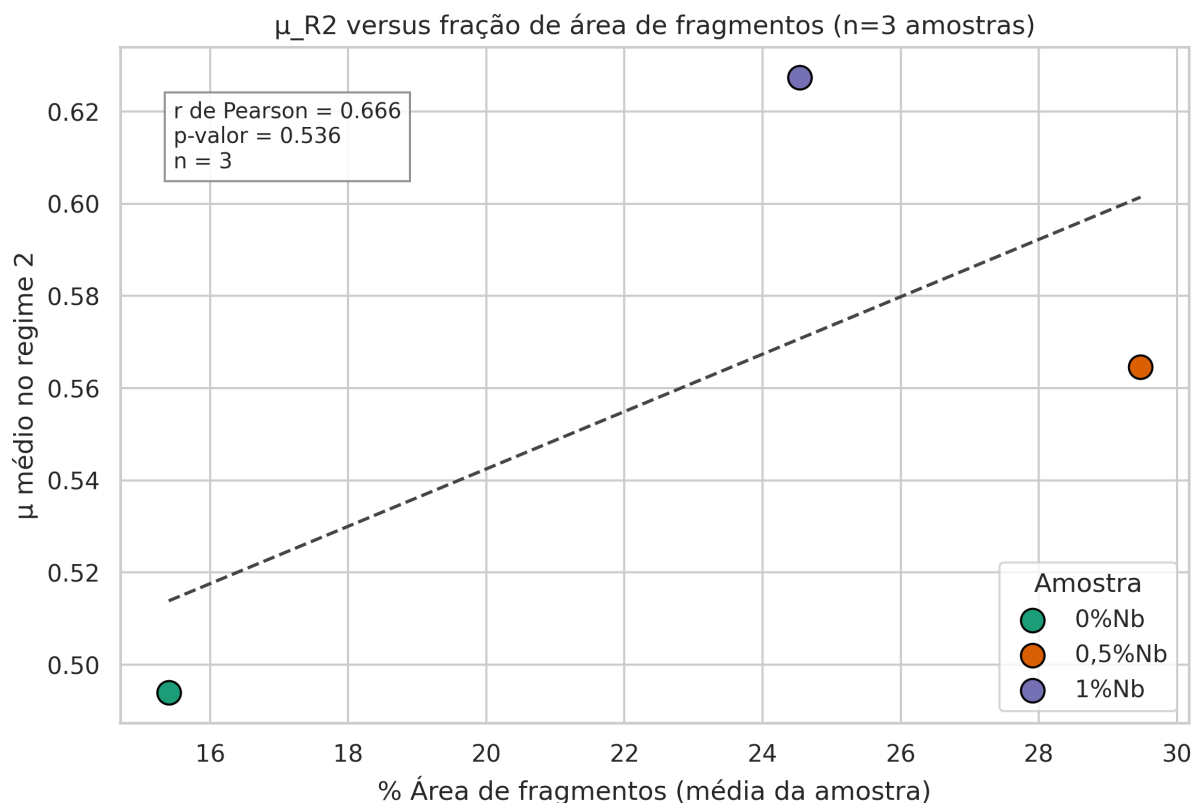
4.4 Correlações entre atrito e morfologia da pista

A análise central deste TCC consiste em verificar até que ponto as métricas da pista de desgaste se correlacionam com o coeficiente de atrito medido. As correlações em nível de amostra ($n = 3$) devem ser lidas como tendências, e não como conclusões com força estatística, porque três pontos são insuficientes para inferir associação com baixa incerteza. Apresentamos abaixo o panorama.

4.4.1 μ_{R2} versus %Área de fragmentos

A Figura 14 traz o gráfico de dispersão entre o COF médio no regime 2 e a fração de fragmentos média por amostra. O coeficiente de correlação de Pearson é $r = 0,67$. A relação é positiva (quanto mais fragmentos, maior o atrito) mas a tendência não é uniforme simples: o ponto de 0,5 % Nb está acima do de 1 % Nb na variável %Area FRAG, enquanto no COF é o inverso.

Figura 14 – μ_{R2} versus %Área de fragmentos (médias por amostra; $n = 3$).



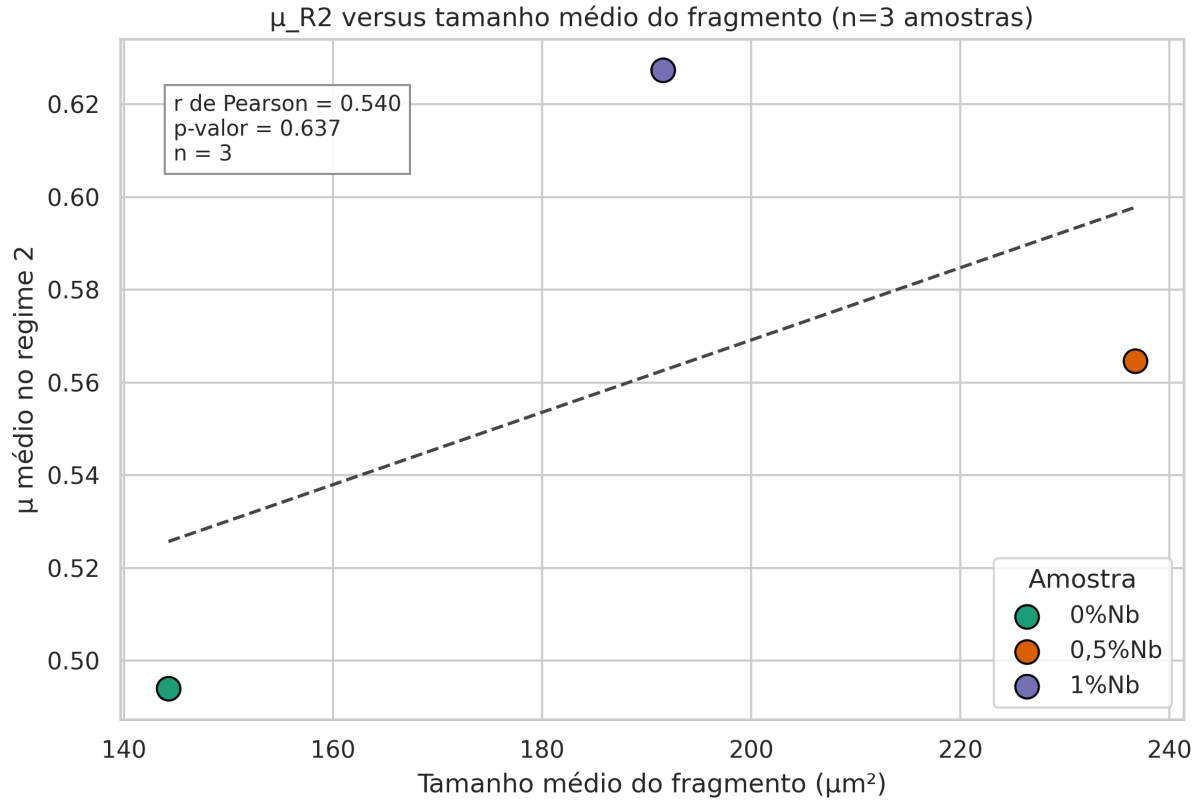
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.4.2 μ_{R2} versus tamanho médio do fragmento

A Figura 16 mostra o COF contra o tamanho médio do fragmento. Pearson $r = 0,54$. A tendência é positiva, mas novamente o ponto de 0,5 % Nb fica acima do de 1 % Nb. A in-

interpretação física é que o tamanho do fragmento é importante, mas não é a única variável que muda.

Figura 15 – μ_{R2} versus tamanho médio do fragmento ($n = 3$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.4.3 μ_{R2} versus %Área da pista contínua

Pearson $r = -0,82$ — a correlação mais forte (em módulo) de todas. Em palavras: quanto maior a fração de pista contínua, menor o coeficiente de atrito. Esse achado tem leitura imediata em termos de mecanismo. Uma pista contínua representa contato relativamente estável, com transferência homogênea ou aderência; uma pista quebrada representa contato instável, com detritos solto entre as superfícies (terceiro corpo), que aumentam o atrito por engatamento mecânico.

4.4.4 μ_{R2} versus dureza HRC

Pearson $r = -0,64$. A tendência aparente é negativa, mas atenção: como a dureza praticamente não varia entre as três amostras, esse coeficiente é dominado por variações pequenas e tem baixo significado físico. O resultado central é que a dureza não explica a tendência do COF: o coeficiente de atrito muda muito sem que a dureza mude proporcionalmente.

4.4.5 μ_{R2} versus Ra pré-teste

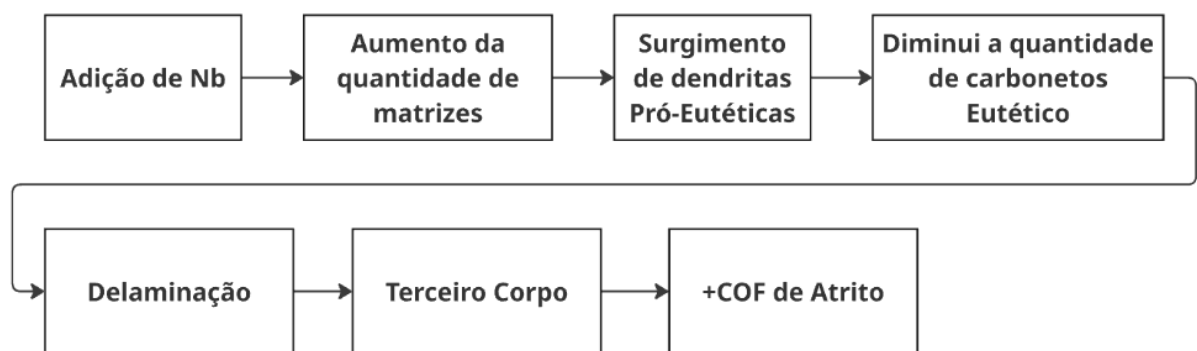
Pearson $r = -0,29$. Como a Ra também não é uniforme com Nb, essa correlação é fraca e o teste estatístico não a confirma ($p > 0,8$). A rugosidade pré-teste, dentro da faixa observada, não é o determinante principal do COF.

4.5 Mecanismo de desgaste proposto

A análise conjunta dos resultados permite propor um mecanismo de desgaste consistente com todas as evidências obtidas. O coeficiente de atrito cresceu de forma monotônica com o teor de nióbio em ambos os regimes, enquanto a dureza global permaneceu praticamente constante entre 51 e 52 HRC nas três amostras. Paralelamente, a fração de fragmentos aumentou com a adição de Nb, atingindo patamar entre 0,5 % e 1 %, e a fração de pista contínua diminuiu, correlacionando-se negativamente com μ_{R2} ($r = -0,82$). A microestrutura, por sua vez, transitou de eutética na liga sem nióbio para progressivamente hipoeutética nas ligas com Nb, com surgimento de dendritas pró-eutéticas e carbonetos NbC adicionais.

Esse quadro é compatível com a hipótese formulada na Introdução: a adição de nióbio cria uma microestrutura com mais interfaces internas (matriz/dendritas, dendritas/eutético, NbC/M₇C₃). Sob deslizamento contra o pino de metal duro, essas interfaces concentram tensões de cisalhamento e nucleiam microtrincas subsuperficiais. O crescimento dessas trincas leva ao destacamento de placas de material — mecanismo de delaminação descrito por Suh e revisado por HUTCHINGS (1992) — sem que se exija redução da dureza global.

Figura 16 – Fluxograma mecanismo de desgaste.

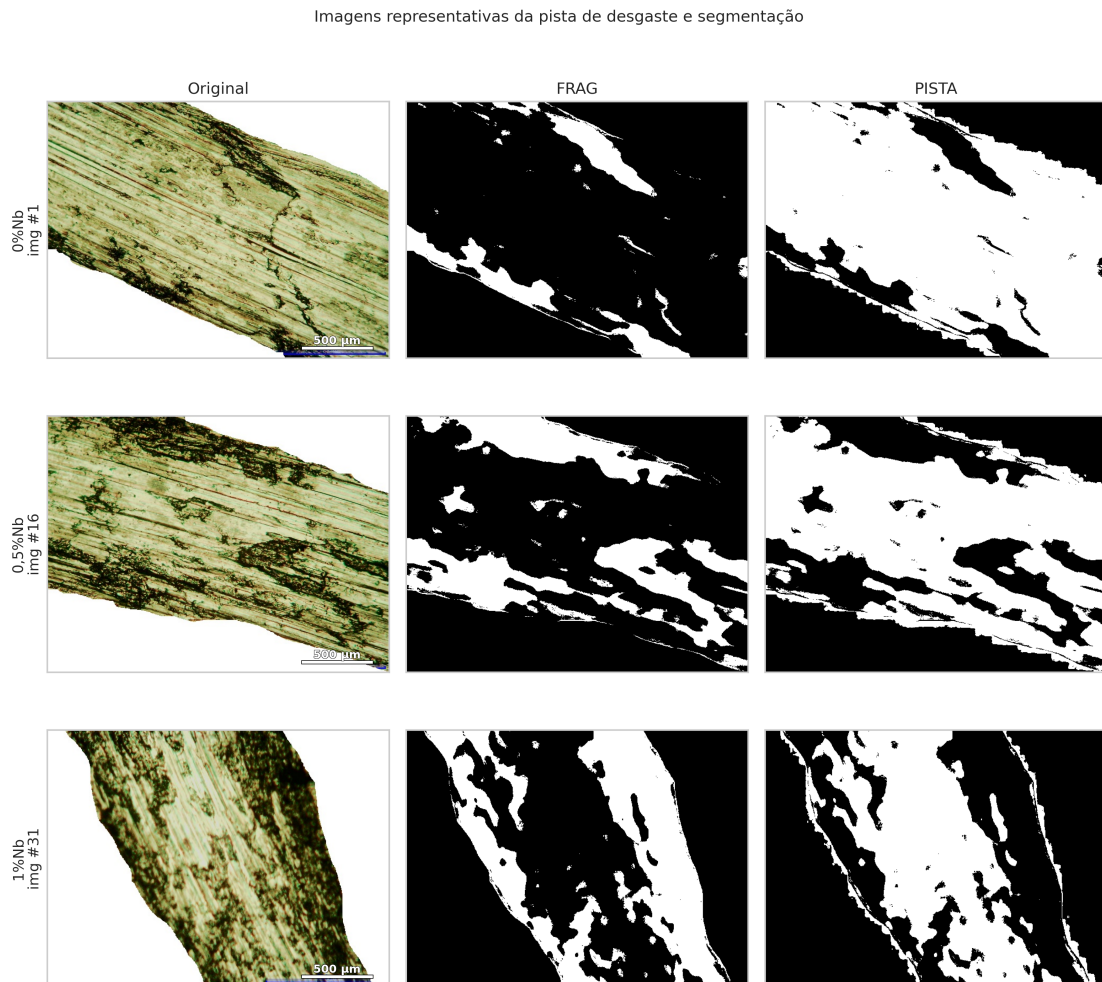


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As placas destacadas ficam aprisionadas entre pino e disco e atuam como terceiro corpo. Quando os fragmentos são pequenos e numerosos, podem reduzir o atrito por rolamento; quando são maiores ou angulares, aumentam o atrito por engatamento mecânico (*interlocking*) e por sulcamento adicional da pista. A predominância desse segundo comportamento nas amostras com nióbio explica o aumento de μ_{R2} acompanhado da perda de continuidade visual da pista, conforme ilustrado na Figura 17: enquanto a amostra sem nióbio apresenta grandes áreas contínuas

com poucos detritos isolados, as amostras com Nb exibem uma “colcha de retalhos” de fragmentos variados, com redução expressiva da área e da conectividade da pista contínua.

Figura 17 – Imagens representativas da pista e da segmentação (linhas: amostras; colunas: original, FRAG, PISTA).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Cabe registrar uma observação importante. MELO (2018) reportou, em ensaio abrasivo (ASTM G65 com roda de borracha e areia), que a liga 0,5 % Nb teve menor taxa de desgaste que a liga 0 % Nb (ganho de 27 % a 32 %), enquanto a liga 1 % Nb foi equivalente à 0 % Nb. No ensaio deslizante deste trabalho (ASTM G99 com pino de metal duro), o coeficiente de atrito vai na direção oposta — cresce uniformemente com o Nb. Não há contradição: os dois ensaios medem coisas diferentes (taxa volumétrica de desgaste abrasivo *versus* coeficiente de atrito sob deslizamento) e usam contracorpos distintos (areia solta *versus* pino sólido de metal duro). Em desgaste abrasivo, os NbC ajudam ao “ancorar” a microestrutura contra penetração; em desgaste deslizante, o mesmo NbC, em maior quantidade, contribui para multiplicar interfaces e favorecer delaminação. A contribuição do Nb ao desgaste depende, portanto, do tipo de solicitação tribológica.

5 CONCLUSÃO

Apesar do baixo número de amostras, o presente trabalho investigou a influência da adição de nióbio no comportamento tribológico do ferro fundido branco alto cromo sob deslizamento contra pino de metal duro. Os resultados confirmaram a hipótese de trabalho: o coeficiente de atrito cresceu de forma consistente com o aumento do teor de nióbio em ambos os regimes temporais, sem que houvesse variação relevante na dureza global das ligas. Esse comportamento evidencia que a dureza macroscópica, isoladamente, não é suficiente para prever o desempenho tribológico em condições de deslizamento.

A explicação para esse fenômeno reside nas mudanças microestruturais promovidas pelo nióbio. A formação preferencial do carboneto de nióbio durante a solidificação reduz a disponibilidade de carbono para os carbonetos de cromo, tornando a microestrutura progressivamente mais heterogênea e criando mais interfaces internas entre as fases. Sob deslizamento, essas interfaces concentram tensões cisalhantes, favorecem a nucleação de microtrincas e levam ao destacamento de material por delaminação. Os fragmentos gerados atuam como terceiro corpo entre as superfícies, aumentando o atrito por engatamento mecânico — padrão confirmado pela análise quantitativa da morfologia da pista.

Os resultados reforçam ainda que a seleção de ligas com nióbio deve considerar o modo de desgaste predominante na aplicação, uma vez que os benefícios documentados em condições abrasivas não se reproduzem necessariamente em condições deslizantes.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A532/A532M-10: Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons**. West Conshohocken, PA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. G99-17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken, PA, 2017.
- BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- DAVIS, J. R. (Ed.). **Cast irons**. Materials Park: ASM International, 1996. (ASM Specialty Handbook).
- FILIPOVIC, M.; KAMBEROVIC, Z.; KORAC, M.; GAVRILOVSKI, M. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C-Nb white cast irons. **Materials and Design**, v. 47, p. 41–48, 2013.
- HE-XING, C.; ZHEN-CHANG, C.; JIN-CAI, L.; HUI-TING, L. The effect of niobium on the wear resistance of high chromium cast iron. **Wear**, v. 166, p. 197–201, 1993.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992.
- JOST, H. P. **Lubrication (tribology): education and research**. London, 1966.
- MELO, I. N. d. **Influência da adição de nióbio na microestrutura e nas propriedades de desgaste de ferro fundido branco alto cromo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — REDEMAT – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- PENAGOS, J. J. **Microestrutura e desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos alto cromo**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- PEREIRA, P. H. R. **Influência da adição de nióbio sobre a microestrutura e a resistência ao desgaste abrasivo do ferro fundido branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- STEFANESCU, D. M. **Science and engineering of casting solidification**. 2. ed. New York: Springer, 2011.
- THORPE, W. R.; CHICCO, B. The Fe-rich corner of the metastable C-Cr-Fe liquidus surface. **Metallurgical Transactions A**, v. 16, p. 1541–1549, 1985.
- ZUM GAHR, K. H. Abrasive wear of white cast irons. **Wear**, v. 64, n. 2, p. 175–194, 1980.

APÊNDICE A – MACRO DE SEGMENTAÇÃO NO IMAGEJ

A macro `Macro seguimentação pistas deslizamento.ijm` (localizada em `05 - RELATÓRIO DO ENSAIO\Dados vinícius parte 2\Imagens para tratamento`) automatiza a segmentação das 43 imagens da pista. Os passos resumidos são:

1. Abertura sequencial das imagens `1.jpg` a `43.jpg`.
2. Aplicação do classificador supervisionado pré-treinado (`classifier_26.model`).
3. Binarização da classe FRAG (limiar 150–160), gerando máscara `N- SEG - FRAG.tif` e tabelas `Results.csv` e `Summary.csv` com as métricas (Area, %Area, Perimeter, Major, Minor, Angle, Circularidade, Solidity, Feret, IntDen).
4. Binarização da classe PISTA (limiar 70–100), gerando `N- SEG - PISTA.tif` e tabelas equivalentes.
5. Consolidação automática em `1 - consolidado csv.csv` ao final do processamento.

APÊNDICE B – DATASET CONSOLIDADO

O arquivo `dataset\dados_consolidados.xlsx` contém as seguintes abas:

- `amostras` — composição química resumida e propriedades médias por liga.
- `cof_serie` — série temporal completa do COF (3 414 pontos, sete colunas: tempo, distância, revoluções, força, COF, LVDT, temperatura).
- `cof_regime1 / cof_regime2` — pontos do COF segregados pelo regime.
- `seg_imagem` — 87 linhas (43 imagens $\times$ 2 classes) com 17 métricas extraídas pelo ImageJ.
- `analise_estatistica` — resultados completos de testes *t*, ANOVA e correlações e regressão.
- `cof_amostra` — resumo cruzando médias por amostra.

APÊNDICE C – SCRIPT DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

O arquivo `analise\analise_tcc.py` traz o script Python que reproduz toda a análise estatística desta monografia, incluindo a geração das 16 figuras em `figuras\`. As dependências utilizadas foram: `pandas`, `numpy`, `scipy`, `statsmodels`, `matplotlib`, `seaborn`, `openpyxl`, `xlrd`, `Pillow` e `pdfplumber`.

ANEXO A – NORMA ASTM G99

A norma técnica ASTM G99 “*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*” regulamenta o ensaio de desgaste pino-sobre-disco utilizado neste TCC. A versão consultada está disponível no diretório de orientação 02 – NORMA REGULAMENTADORA ASTM G99 do material de estudo do aluno.