

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

Otávio Luiz Nunes da Silva

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA ÓPTICA SEGMENTADA E DA
TOPOGRAFIA LOCAL EM FERROS FUNDIDOS ALTO CROMO:
comparativo entre ferros fundidos com diferentes graus de eutecticidade**

OTÁVIO LUIZ NUNES DA SILVA

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA ÓPTICA SEGMENTADA E DA
TOPOGRAFIA LOCAL EM FERROS FUNDIDOS ALTO CROMO:
comparativo entre ferros fundidos com diferentes graus de eutecticidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

Betim - MG
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

S586a Silva, Otávio Luiz Nunes da

Análise da microestrutura óptica segmentada e da topografia local em ferros fundidos alto cromo: comparativo entre ferros fundidos com diferentes graus de eutecticidade / Otávio Luiz Nunes da Silva. – 2026.

48 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. Fundição. 2. Microscopia. 3. Processos de fabricação. 4. Ferro fundido. 5. Engenharia Mecânica. I. Silva, Otávio Luiz Nunes da. 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 onze 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 **Otávio Nunes da Silva** do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0056068 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Análise da microestrutura óptica segmentada e da topografia local em ferros fundidos alto cromo: comparativo entre ferros fundidos com diferentes graus de eutecticidade**” e foi APROVADO, com 75 (setenta e cinco) pontos. A sessão foi encerrada às doze horas e trinta minutos. 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 20:33, 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 09:43, 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 19:43, 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 **2813603** e o código CRC **D3342B52**.

23792.000877/2026-74

2813603v1

Dedico este trabalho aos meus familiares, pelo apoio incondicional durante a graduação, aos profissionais que me acompanham em minha trajetória profissional, e aos professores que me inspiraram ao longo do curso de Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais e familiares, pelo apoio constante durante toda a graduação em Engenharia Mecânica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), *Campus* Betim.

Gostaria de reforçar meu agradecimento à minha esposa, Camila, por toda a parceria ao longo do período em que estamos juntos e por acreditar em mim como esposo, pai de família e profissional.

Estendo meus agradecimentos aos professores do curso, que contribuíram para minha formação em mecânica, materiais e ciência básica, e aos colegas de turma, com quem dividi as dificuldades e conquistas dos últimos semestres.

Deixo um agradecimento especial ao professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo, que me orientou e forneceu apoio técnico, infraestrutura e parte de seu tempo para que o trabalho fosse desenvolvido em conformidade com os pré-requisitos da coordenação do curso e adequado à metodologia científica. Estendo meu agradecimento ao professor Flávio Magno de Carvalho Fonseca, que me ofereceu grande suporte na etapa final de conclusão e adequação do trabalho.

Por fim, agradeço ao IFMG *Campus* Betim, pela infraestrutura, pelas bibliotecas e pelos laboratórios que tornaram possível a realização deste trabalho.

“O que medimos, podemos comparar; o que comparamos,
podemos compreender.”
(adaptado, autor desconhecido)

RESUMO

Os ferros fundidos brancos com alto teor de cromo são amplamente utilizados em revestimentos sujeitos a desgaste abrasivo, em virtude da elevada dureza dos carbonetos M_7C_3 presentes em sua microestrutura e da tenacidade controlada de suas matrizes metálicas. O presente estudo analisa, em conjunto, a microestrutura óptica segmentada e a topografia local de quatro ferros fundidos alto cromo com teores de carbono crescentes, variando entre 2,57 % e 3,36 %. As amostras foram recebidas já submetidas ao ensaio de abrasão a três corpos do tipo roda de borracha, realizado previamente no CEFET-MG, em Belo Horizonte, conforme a norma ASTM G65. No âmbito deste trabalho, o autor realizou a aquisição das imagens das superfícies desgastadas e dos respectivos mapas de altura por microscopia confocal no equipamento Olympus DSX1000, nas instalações do SENAI, em Itaúna, MG. As micrografias ópticas de referência foram disponibilizadas previamente e utilizadas apenas como apoio para a identificação das fases. As imagens obtidas no Olympus DSX1000 forneceram a base para a segmentação dos carbonetos e para a análise topográfica. A separação entre matriz e carbonetos foi realizada por limiarização automática sobre a luminância das imagens, gerando máscaras binárias com as quais foram extraídos descritores morfológicos (área, diâmetro equivalente, circularidade, razão de aspecto e solidez). Os mapas de altura foram nivelados por regressão robusta de Huber, com escolha automática entre modelo planar e quadrático via validação cruzada espacial, isolando-se assim a variação local da superfície. A microestrutura segmentada foi, então, sobreposta ao mapa de altura nivelado. A análise qualitativa do relevo e da profundidade local revelou padrões distintos entre as quatro composições. Nas composições hipoeutéticas, o relevo residual organiza-se em escala maior que o carboneto individual, acompanhando a alternância entre colônias eutéticas e corredores de matriz proeutética. Esse arranjo indica que a fase dura e a matriz respondem como um conjunto, e não isoladamente, no campo analisado. A composição quase-eutética apresentou os sulcos mais profundos e contínuos do conjunto. A composição hipereutética exibiu carbonetos primários grandes coexistindo com regiões de menor relevo, com indícios de micro-lascamento dessas partículas. Esses comportamentos foram interpretados em conformidade com a literatura clássica sobre relação microestrutura-desgaste em ferros fundidos alto cromo.

Palavras-chave: ferros fundidos alto cromo; desgaste abrasivo; carbonetos M_7C_3 ; microscopia confocal; eutecticidade.

ABSTRACT

High-chromium white cast irons are widely used as wear-resistant linings due to the high hardness of the M_7C_3 carbides embedded in their microstructure and the controlled toughness of their metallic matrices. The present study analyses, in combination, the segmented optical microstructure and the local topography of four high-chromium white cast irons with increasing carbon contents, ranging between 2.57 % and 3.36 %. The analysed surfaces correspond to the worn tracks from rubber wheel abrasion testing according to ASTM G65 and were observed by confocal microscopy on an Olympus DSX1000. The images from this acquisition provided both the basis for carbide segmentation and the height maps used in the topographic analysis. The separation of matrix and carbides was carried out by automatic thresholding of the luminance of the images, producing binary masks from which morphological descriptors (area, equivalent diameter, circularity, aspect ratio and solidity) were extracted. The height maps were levelled using robust Huber regression, with automatic selection between planar and quadratic trend models through spatial cross-validation, thereby isolating the local variation of the surface. The segmented microstructure was then overlaid on the levelled height map. The qualitative analysis of relief and local depth revealed distinct patterns among the four compositions. In the hypoeutectic compositions, the residual relief is organised at a scale larger than the individual carbide, following the alternation between eutectic colonies and proeutectic matrix corridors. This arrangement indicates that the hard phase and the matrix respond as a single set, rather than in isolation, in the analysed field. The near-eutectic composition showed the deepest and most continuous grooves of the set. The hypereutectic composition showed large primary carbides coexisting with regions of lower relief, with evidence of micro-spalling of these particles. These behaviours were interpreted in agreement with the classical literature on microstructure-wear relationships in high-chromium white cast irons.

Keywords: high-chromium white cast irons; abrasive wear; M_7C_3 carbides; confocal microscopy; eutecticity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de uma projeção do sistema Fe–Cr–C destacando as regiões hipoeutética, eutética e hipereutética.	17
Figura 2 – Microestrutura típica de uma liga hipoeutética.	18
Figura 3 – Microestrutura típica de uma liga eutética.	18
Figura 4 – Microestrutura típica de uma liga hipereutética, evidenciando carbonetos primários grandes.	19
Figura 5 – Morfologia típica dos carbonetos eutéticos M_7C_3 em FFAC.	19
Figura 6 – Efeito do plano de corte sobre a morfologia aparente dos carbonetos M_7C_3 . . .	20
Figura 7 – Esquema dos mecanismos básicos de desgaste.	23
Figura 8 – Representação esquemática do ensaio de abrasão por roda de borracha com areia seca na configuração vertical.	27
Figura 9 – Imagens das superfícies desgastadas das ligas A, B, C e D, recortadas para o mínimo comum de 1560×1160 px. Os carbonetos M_7C_3 aparecem em tons claros e a matriz, em tons escuros.	31
Figura 10 – Máscaras binárias obtidas por limiarização de Otsu sobre a luminância das imagens da Figura 9. Os pixels brancos correspondem aos carbonetos.	32
Figura 11 – Liga A: malha original z , tendência plana ajustada e malha corrigida z_{resid} . O perfil central destaca a remoção da inclinação.	34
Figura 12 – Liga B: malha original, tendência plana e malha corrigida.	35
Figura 13 – Liga C: malha original, tendência plana e malha corrigida.	35
Figura 14 – Liga D: malha original, tendência quadrática e malha corrigida. A curvatura residual da superfície é absorvida pelo modelo quadrático.	36
Figura 15 – Micrografias ópticas de referência das quatro ligas, produzidas em etapa experimental anterior e disponibilizadas ao autor: (a) Liga A, (b) Liga B, (c) Liga C e (d) Liga D.	38
Figura 16 – Sobreposição do mapa de altura residual sobre a imagem da superfície desgastada da pista de ensaio de roda de borracha: (a) Liga A, (b) Liga B, (c) Liga C e (d) Liga D.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das ligas estudadas e classificação quanto à euteticidade (% em massa).	26
Tabela 2 – Métricas microestruturais medianas obtidas por segmentação.	31
Tabela 3 – Modelo de nivelamento topográfico escolhido por liga por regressão de Huber com validação cruzada espacial.	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CV	Coeficiente de Variação
FFAC	Ferros Fundidos Alto Cromo
FFB	Ferros Fundidos Brancos
FVC	Fração Volumétrica de Carbonetos
HV	Dureza Vickers
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
MAE	Erro Absoluto Médio (<i>Mean Absolute Error</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
PADI	Processamento e Análise Digital de Imagens
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio (<i>Root Mean Square Error</i>)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
ROI	Região de Interesse (<i>Region of Interest</i>)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIF	Formato de Imagem (<i>Tagged Image File Format</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%C$	Percentual em peso de carbono
$\%Cr$	Percentual em peso de cromo
μm	Micrômetro ($1 \mu m = 10^{-6} m$)
ρ	Coefficiente de correlação de Spearman
p	Probabilidade associada a um teste estatístico (p-valor)
Sa	Rugosidade aritmética média da superfície
Sq	Rugosidade quadrática média da superfície
Sz	Altura máxima da superfície (pico a vale)
z	Altura da superfície
z_{resid}	Altura residual após nivelamento topográfico
M_7C_3	Carboneto metálico predominante em ferros fundidos alto cromo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto	14
1.2	Problema	14
1.3	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Ferros fundidos alto cromo	16
2.2	Solidificação e microestruturas	16
2.3	Microscopia óptica em FFAC	19
2.4	Segmentação automática de microestruturas	20
2.5	Topografia de superfícies e nivelamento	21
2.6	Noções básicas de desgaste abrasivo	22
3	METODOLOGIA	25
3.1	Amostras estudadas	25
3.2	Aquisição das imagens e mapas de altura	26
3.3	Segmentação binária	28
3.4	Métricas microestruturais	28
3.5	Nivelamento topográfico	28
3.6	Visualizações geradas	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Caracterização microestrutural	30
4.2	Nivelamento topográfico	33
4.3	Sobreposição microestrutura-topografia e análise qualitativa do relevo .	37
5	CONCLUSÃO	42
5.1	Principais conclusões	42
5.2	Trabalhos futuros	42
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A – FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS	46
	ANEXO A – NORMA ASTM A532 — RESUMO DAS CLASSES	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A mineração brasileira sustenta cadeias produtivas inteiras e mobiliza grandes quantidades de equipamentos mecânicos submetidos a desgaste abrasivo intenso, como pás carregadeiras, calhas de transporte, revestimentos de moinhos, britadores e bombas para transporte de fluidos. O consumo de peças sujeitas à abrasão constitui parcela relevante do custo operacional das mineradoras, sobretudo nas plantas em que o contato contínuo entre minerais duros e superfícies metálicas é constante (XU; VOSE; STJOHN, 1993; VIÁFARA *et al.*, 2023). O estudo de materiais resistentes ao desgaste assume, portanto, importância estratégica para o engenheiro vinculado a esse setor.

Entre as ligas tradicionalmente empregadas em revestimentos de desgaste destacam-se os ferros fundidos brancos com alto teor de cromo, ou ferros fundidos alto cromo, por sua microestrutura particular: uma matriz metálica tenaz rica em carbonetos do tipo M_7C_3 , cuja dureza varia entre 1.500 e 1.800 HV. A combinação entre dureza local elevada e suporte mecânico distribuído pela matriz justifica o uso intensivo dessa família de ligas em peças críticas (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A norma técnica ASTM A532 (ASTM INTERNATIONAL, 2019) consolida as composições químicas e classes desses ferros fundidos resistentes à abrasão, com teores de cromo entre 11 % e 30 % e teores de carbono entre 2 % e 3,6 %, aproximadamente. A microestrutura final, contudo, depende fortemente da posição do teor de carbono em relação ao ponto eutético do sistema Fe–Cr–C. Ligas hipoeutéticas mostram dendritas de austenita proeutética envolvidas pelo constituinte eutético; ligas eutéticas apresentam estrutura essencialmente lamelar; ligas hipereutéticas exibem carbonetos primários grandes, hexagonais ou agulhares, envolvidos pelo eutético (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; WIENGMON, 2011). Essas diferenças condicionam o tamanho, a forma e a distribuição espacial dos carbonetos, com reflexos diretos sobre o relevo observado nas superfícies submetidas ao desgaste abrasivo.

1.2 Problema

O relevo de uma superfície desgastada de ferro fundido alto cromo carrega, em escala microscópica, marcas da interação entre matriz e carbonetos durante a abrasão. Sulcos, regiões deprimidas e bandas de remoção são observados de modo recorrente nessas superfícies e refletem a história de solicitação imposta pelo ensaio de desgaste. Caracterizar essa relação entre microestrutura e relevo, com base na imagem da superfície desgastada e no mapa de altura associado, constitui um exercício relevante de análise qualitativa, alinhado às ferramentas usadas correntemente na pesquisa em tribologia.

A integração entre microestrutura segmentada e altura local nivelada permite investigar como o arranjo dos carbonetos se relaciona com as regiões mais altas e mais baixas da pista

desgastada. As etapas necessárias, que envolvem o registro da imagem, a segmentação binária dos carbonetos, a aquisição do mapa de altura e a remoção da tendência global, compõem uma abordagem integrada de caracterização microestrutural e topográfica aplicada a materiais de engenharia.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo geral caracterizar a microestrutura óptica e a topografia local de quatro ligas de ferro fundido alto cromo com diferentes graus de eutecticidade, correlacionando padrões de relevo com a literatura sobre relação microestrutura-desgaste em FFAC (ZUM GAHR; ELDIS, 1980; ZUM GAHR, 1987; LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000).

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar a composição química das quatro ligas e classificá-las quanto ao caráter hipoeutético, quase-eutético ou hipereutético;
- b) realizar a segmentação binária dos carbonetos M_7C_3 nas imagens das superfícies desgastadas e quantificar descritores morfológicos básicos;
- c) realizar o nivelamento topográfico das amostras, comparando os modelos planar e quadrático para a remoção da tendência global da superfície;
- d) sobrepor as imagens das superfícies desgastadas aos respectivos mapas de altura nivelados e analisar qualitativamente a relação entre o arranjo dos carbonetos e o relevo local.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão da relação entre microestrutura, topografia superficial e desgaste em ferros fundidos alto cromo. Inicialmente, são discutidas as características gerais dessa família de ligas e seus principais aspectos de solidificação. Em seguida, abordam-se os procedimentos de microscopia óptica, segmentação de imagens, análise topográfica e desgaste abrasivo, que sustentam a metodologia e a discussão dos resultados deste trabalho.

2.1 Ferros fundidos alto cromo

Os ferros fundidos brancos formam uma família de ligas Fe–C–liga em que a maior parte do carbono se manifesta na forma de carboneto, e não como grafita. Entre eles, os ferros fundidos alto cromo ocupam lugar de destaque por combinarem uma matriz metálica com tenacidade controlada e alta fração de carbonetos M_7C_3 . Essa associação confere aos FFAC bom desempenho contra desgaste abrasivo a baixo impacto, justificando seu uso em placas de revestimento, britadores e revestimentos de moinhos da indústria mineral (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

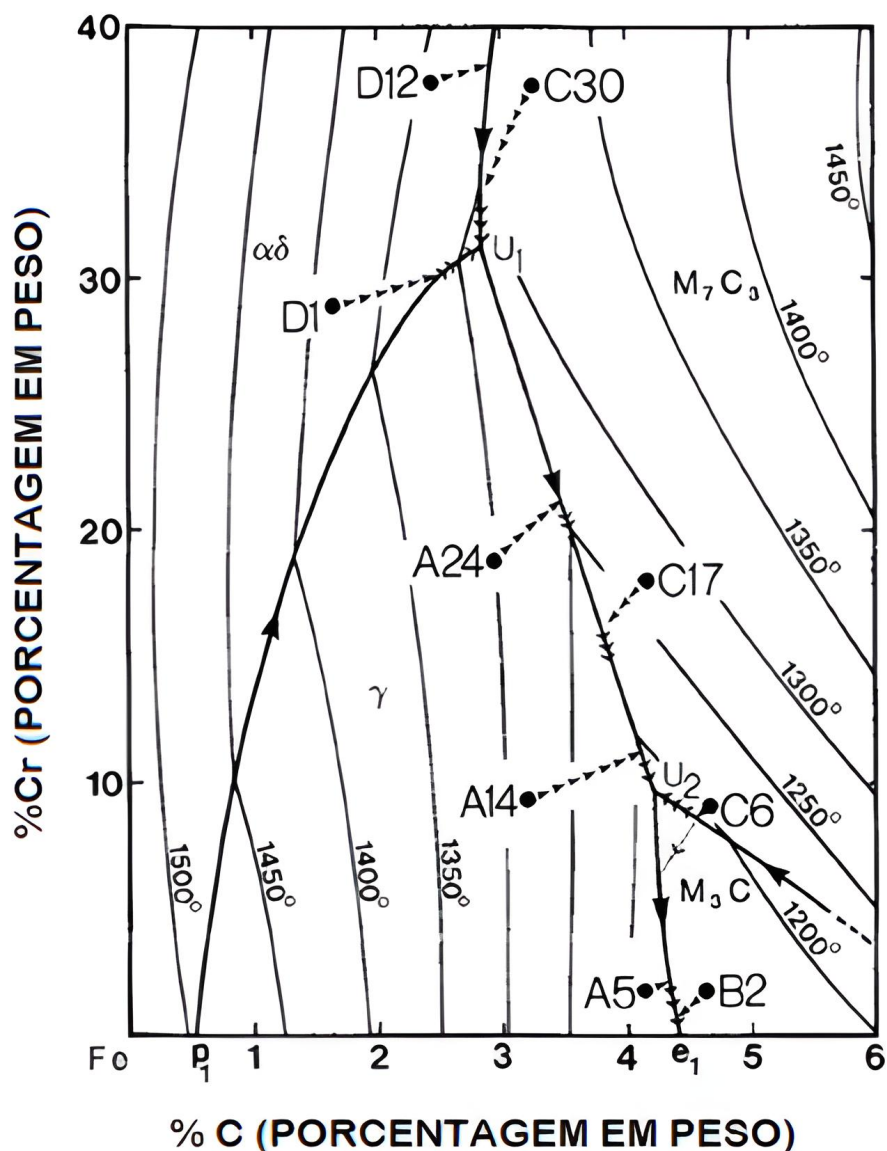
A norma técnica que rege as composições comerciais é a ASTM A532 (ASTM INTERNATIONAL, 2019), organizada em classes de ferros fundidos brancos resistentes à abrasão. A Classe II A corresponde a ligas brancas ao cromo com teor de cromo entre 11,5 e 14,0 %; a Classe II B compreende composições com 14 a 18 % de cromo, indicadas para desgaste moderado; a Classe II D inclui ligas com cerca de 18 a 23 % de cromo e adição de molibdênio; e a Classe III A, central neste trabalho, reúne ferros fundidos com 23 a 28 % de cromo, faixa em que se enquadram as ligas estudadas no Capítulo 3.

2.2 Solidificação e microestruturas

A microestrutura final de um ferro fundido alto cromo é determinada, em primeiro lugar, pelo posicionamento do teor de carbono em relação ao ponto eutético do sistema Fe–Cr–C, esquematizado na Figura 1. Quando o carbono está abaixo do eutético, a solidificação inicia-se pela formação de dendritas de austenita proeutética; quando está acima, inicia-se pela formação de carbonetos primários M_7C_3 . O restante do líquido, em ambos os casos, solidifica como constituinte eutético (austenita + M_7C_3). Essa diferença de caminho de solidificação produz três famílias microestruturais distintas.

Conforme descrito por Laird, Gundlach e Röhrig (2000) e Coronado e Sinatora (2009), nas ligas hipoeutéticas (Figura 2), observam-se grandes regiões de matriz proeutética, em geral na forma de dendritas, intercaladas por colônias do constituinte eutético. Os carbonetos eutéticos aparecem como pequenas lâminas ou hastes orientadas dentro do eutético, e a fração total de carbonetos costuma ser menor que a observada nas ligas eutéticas e hipereutéticas,

Figura 1 – Esquema de uma projeção do sistema Fe–Cr–C destacando as regiões hipoeutética, eutética e hipereutética.



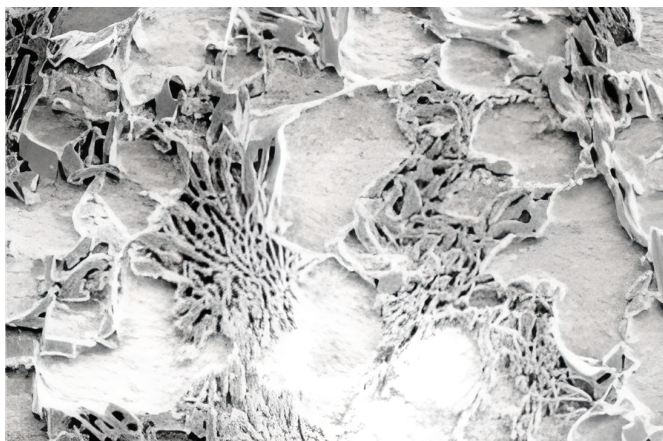
Fonte: Adaptado de Thorpe e Chicco apud Laird, Gundlach e Röhrig (2000).

exatamente por haver mais matriz proeutética entre essas colônias.

Nas ligas próximas ao ponto eutético (Figura 3), a microestrutura é dominada pelo constituinte eutético, com carbonetos lamelares ou colunares finamente distribuídos. A fração de carbonetos aproxima-se do máximo teórico do sistema, e a ausência de dendritas proeutéticas significativas confere à microestrutura aspecto mais homogêneo, embora com tamanhos individuais de carbonetos frequentemente menores que os observados nas demais classes (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; CORONADO; SINATORA, 2009).

Nas ligas hipereutéticas (Figura 4), o excesso de carbono favorece a formação de carbonetos primários de tamanho grande, com seção hexagonal quando cortados perpendicularmente ao eixo de crescimento ou agulhar quando cortados paralelamente. Esses carbonetos

Figura 2 – Microestrutura típica de uma liga hipoeutética.



Fonte: Adaptado de Laird, Gundlach e Röhrig (2000).

Figura 3 – Microestrutura típica de uma liga eutética.



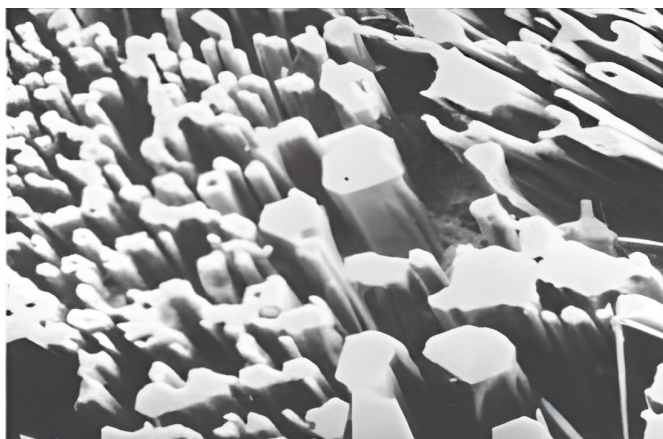
Fonte: Adaptado de Laird, Gundlach e Röhrig (2000).

primários, claros na microscopia óptica, são envolvidos pelo constituinte eutético e dominam a aparência da microestrutura, com reflexos importantes sobre a forma e a distribuição espacial dos carbonetos (DURMAN, 1985; LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; WIENGMUON, 2011).

A morfologia dos carbonetos M_7C_3 é fortemente influenciada pelo plano de corte da amostra. Como apontam Laird, Gundlach e Röhrig (2000) e Wiengmoon (2011), carbonetos eutéticos em colônias podem parecer partículas discretas quando cortados perpendicularmente ao seu eixo de crescimento, mas revelam-se hastes ou lâminas quando cortados paralelamente. Essa dependência do plano de corte, ilustrada nas Figuras 5 e 6, deve ser lembrada ao interpretar valores agregados de área, razão de aspecto e circularidade medidos em uma única seção plana.

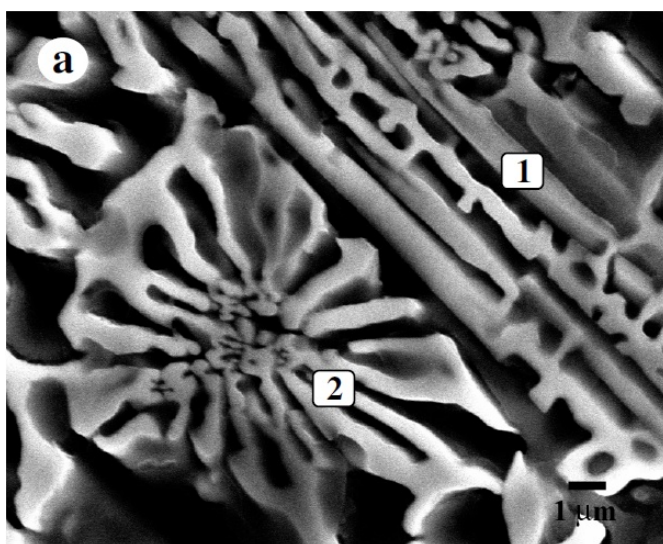
Essa diferenciação microestrutural justifica a comparação entre as quatro ligas estudadas neste trabalho, uma vez que a variação do teor de carbono altera não apenas a fração de carbonetos, mas também sua morfologia, distribuição espacial e possível influência sobre o relevo local.

Figura 4 – Microestrutura típica de uma liga hipereutética, evidenciando carbonetos primários grandes.



Fonte: Adaptado de Laird, Gundlach e Röhrig (2000).

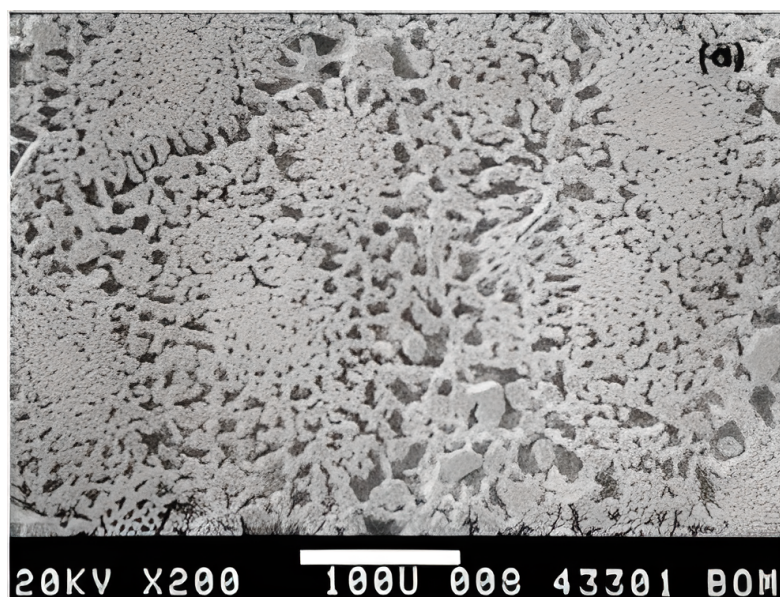
Figura 5 – Morfologia típica dos carbonetos eutéticos M_7C_3 em FFAC.



Fonte: Adaptado de Wiengmoon (2011).

2.3 Microscopia óptica em FFAC

A caracterização microestrutural de ferros fundidos alto cromo apoia-se na microscopia óptica, que distingue carbonetos e matriz pelo contraste de tons de cinza. Em superfícies submetidas ao desgaste, a diferença de dureza entre os carbonetos M_7C_3 e a matriz produz desníveis e contornos bem definidos, de modo que as duas fases podem ser identificadas pelo próprio relevo, sem necessidade de ataque químico. A microscopia confocal acrescenta a essa leitura a medida de altura ponto a ponto, o que permite associar cada região da imagem ao seu relevo local. Defeitos como poros, microtrincas e impurezas exigem atenção do operador para não serem confundidos com carbonetos durante a segmentação (SCHINDELIN *et al.*, 2012).

Figura 6 – Efeito do plano de corte sobre a morfologia aparente dos carbonetos M_7C_3 .

Fonte: Adaptado de Laird, Gundlach e Röhrig (2000).

2.4 Segmentação automática de microestruturas

Segmentar uma imagem é atribuir a cada pixel um rótulo que identifica a fase a qual ele pertence. No caso particular dos ferros fundidos alto cromo, bastam dois rótulos para a maior parte das análises, carboneto e matriz. O resultado da segmentação é uma máscara binária, em que pixels classificados como carboneto recebem o valor 1 e os classificados como matriz recebem o valor 0. Essa conversão do tom de cinza em mapa de fases é o passo que permite, a partir da micrografia óptica, contar partículas, medir suas áreas individuais e calcular descritores morfológicos de forma reproduzível.

A motivação para automatizar essa etapa é dupla. Em primeiro lugar, contagens manuais de centenas de carbonetos por campo microscópico, em dezenas de campos, são impraticáveis em estudos sistemáticos. Em segundo lugar, decisões do operador sobre quanto desenhar da borda do carboneto e sobre como tratar as regiões de transição introduzem variabilidade entre análises e dificultam a comparação entre amostras. A segmentação automática troca essas decisões humanas por um critério explícito, transparente e reproduzível.

A estratégia mais clássica de segmentação é a **limiarização** (em particular, o método de Otsu). A partir do histograma de tons de cinza da imagem, o algoritmo busca o valor de cinza que melhor separa duas populações de pixels, minimizando a variância dentro de cada grupo e maximizando a variância entre os grupos. Pixels mais claros que o limiar são classificados como carbonetos, que aparecem claros sobre a matriz mais escura, e pixels mais escuros, como matriz. A limiarização é simples, rápida e funciona bem quando o contraste entre fases é adequado e a iluminação do campo é uniforme. Ferramentas como o Fiji/ImageJ implementam essa abordagem de forma direta, frequentemente acompanhada de pré-processamentos de contraste e remoção de

ruído para regularizar a imagem antes da aplicação do limiar (SCHINDELIN *et al.*, 2012). No presente trabalho, o pré-processamento das imagens e a limiarização automática pelo método de Otsu foram realizados pelo autor no Fiji/ImageJ, conforme os procedimentos descritos no Apêndice A.

A limiarização apresenta limitações práticas. Quando o contraste varia entre campos, quando a iluminação do microscópio não é perfeitamente uniforme ou quando defeitos como poros e impurezas exibem tons de cinza semelhantes aos dos carbonetos, um único limiar global tende a falhar. Aparecem falsos positivos (regiões da matriz classificadas como carboneto) e falsos negativos (carbonetos mal delimitados em suas bordas), prejudicando especialmente as medições mais sensíveis à forma, como circularidade e razão de aspecto.

Embora este trabalho utilize a limiarização de Otsu, por sua simplicidade, transparência e reprodutibilidade, abordagens mais recentes baseadas em **redes neurais convolucionais** representam alternativas para estudos futuros. Uma rede do tipo U-Net, por exemplo, aprende filtros numéricos capazes de reconhecer bordas, contrastes e padrões de textura em diferentes escalas, produzindo uma máscara de segmentação pixel a pixel a partir de imagens previamente anotadas.

Arquiteturas mais recentes combinam a estrutura convolucional de *encoder* e *decoder* com mecanismos de atenção, que permitem correlacionar regiões distantes da imagem e podem melhorar a delimitação das fronteiras entre fases em microestruturas com colônias eutéticas extensas. Como essas abordagens exigem base de imagens anotadas e maior infraestrutura computacional, são tratadas neste trabalho como possibilidade de refinamento metodológico futuro (CHEN *et al.*, 2021).

Independentemente do método de segmentação escolhido, a etapa seguinte é a rótulação em componentes conexos, em que pixels vizinhos com mesmo valor são agrupados em objetos que correspondem aos carbonetos individuais. Para cada componente, calcula-se a área A , o perímetro P , o diâmetro equivalente $D_{eq} = 2\sqrt{A/\pi}$ (diâmetro do círculo de mesma área), a circularidade $4\pi A/P^2$ (igual a 1 para o círculo perfeito e tendendo a zero à medida que o objeto se torna mais alongado), os eixos principais maior L e menor w , a razão de aspecto L/w e a solidez (razão entre a área do componente e a área do seu envoltório convexo). Esses descritores constituem o vocabulário morfológico básico utilizado nos capítulos seguintes.

2.5 Topografia de superfícies e nivelamento

Microscópios confocais podem registrar, em paralelo à imagem da superfície, um mapa de altura $z(x, y)$ pixel a pixel. Esse mapa fornece, para cada ponto da imagem, a coordenada vertical da superfície em relação a uma referência arbitrária, permitindo associar a microestrutura observada ao relevo local. Em uma superfície desgastada de ferro fundido alto cromo, esse relevo carrega as assinaturas deixadas pela abrasão, como sulcos, bandas de remoção e pequenas crateras.

A superfície analisada não é perfeitamente paralela ao plano focal do microscópio. Pequenas inclinações da amostra e leves curvaturas associadas ao posicionamento e à própria geometria da pista desgastada geram componentes globais de altura que não dizem respeito à microestrutura local e funcionam apenas como artefatos geométricos. Para evidenciar a variação verdadeiramente local da superfície, é prática consolidada subtrair essa tendência global por meio de um modelo polinomial ajustado, em geral planar ou quadrático.

Os dois modelos polinomiais utilizados neste trabalho podem ser escritos como

$$z_{tend}(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (\text{plano}) \quad (2.1)$$

e

$$z_{tend}(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (\text{quadrático}), \quad (2.2)$$

e a altura residual é definida por $z_{resid}(x, y) = z(x, y) - z_{tend}(x, y)$. Para impedir que sulcos profundos ou ressaltos isolados puxem desproporcionalmente o ajuste, adota-se a regressão robusta de Huber, que limita a influência de pontos atípicos. A escolha entre o modelo planar e o quadrático segue um critério de validação cruzada espacial: o quadrático só é mantido quando reduz o erro absoluto médio em pelo menos 5 % em relação ao planar.

Assim, a altura residual obtida após o nivelamento deve ser interpretada como uma medida do relevo local da superfície analisada, e não como uma medida direta de taxa de desgaste. Sua principal função, neste trabalho, é permitir a comparação espacial entre a distribuição dos carbonetos e as regiões mais altas ou mais baixas da superfície.

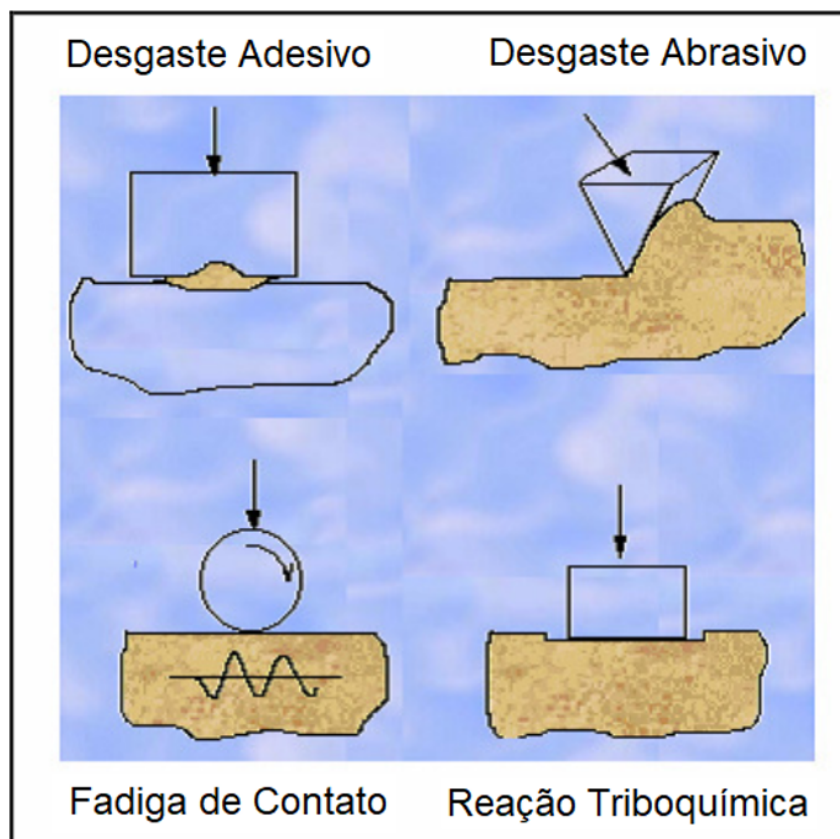
2.6 Noções básicas de desgaste abrasivo

A interpretação do relevo local em FFAC torna-se mais significativa quando associada aos mecanismos de desgaste abrasivo, pois a distribuição entre matriz e carbonetos influencia a forma como a superfície responde à passagem de partículas abrasivas.

O desgaste é, por definição, um fenômeno do tribossistema: depende não apenas do material, mas também do contra-corpo (abrasivo), da interface (fluido, ar) e do ambiente em que ocorre o contato (KATO, 2005; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A Figura 7 resume os mecanismos de desgaste tradicionalmente reconhecidos pela classificação difundida pela DIN 50320 e por Kato (2005).

Dentro do desgaste abrasivo, categoria de interesse para os ferros fundidos alto cromo, três mecanismos elementares precisam ser distinguidos. O *microcorte* ocorre quando uma partícula abrasiva mais dura que a matriz corta uma pequena lasca à frente, formando um sulco bem definido. O *microsulcamento* corresponde à deformação plástica em que o abrasivo empurra material para os lados, formando cordões nas bordas do sulco sem remover material em grande quantidade. O *microtrincamento* caracteriza-se pelo surgimento de trincas locais e ocorre tipicamente em materiais frágeis, como os próprios carbonetos M_7C_3 submetidos a carga elevada. As proporções em que esses três mecanismos se manifestam dependem da relação entre dureza

Figura 7 – Esquema dos mecanismos básicos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Stachowiak (2006).

do abrasivo e dureza local, do tamanho do abrasivo em relação ao tamanho dos carbonetos e da orientação do deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A relação quantitativa clássica entre volume desgastado V , carga normal W , distância percorrida d e dureza do material H é dada pela equação de Archard (ARCHARD, 1953):

$$V = \frac{K \cdot W \cdot d}{H}, \quad (2.3)$$

em que K é um coeficiente adimensional dependente do tribossistema. Em regimes de dureza aproximadamente controlada (mesmas condições de tratamento térmico, abrasivo e temperatura), a variação de K entre amostras passa a refletir essencialmente diferenças microestruturais, o que torna pertinente investigar como a forma e a distribuição dos carbonetos influenciam o comportamento ao desgaste.

No presente trabalho, a equação de Archard não é empregada para cálculo direto de volume desgastado, mas serve como referencial conceitual para compreender por que a dureza local, a matriz metálica e a distribuição dos carbonetos influenciam a resistência ao desgaste abrasivo.

A intuição de que regiões ricas em carbonetos resistem melhor à abrasão é, em primeira aproximação, correta: a dureza local mais alta dificulta a penetração do abrasivo. Esse efeito, contudo, não é linear com a fração de carbonetos. Zum Gahr e Eldis (1980) demonstraram,

em ensaios sistemáticos de roda de borracha em FFAC de teores de carbono variados, que a perda volumétrica passa por um mínimo em torno de 30 % de carbonetos massivos e volta a aumentar quando a fração excede esse patamar, em virtude do arrancamento progressivo dos carbonetos primários em rede maciça. Em frações baixas (em torno de 7 a 10 %), os mesmos autores observaram sulcos profundos sobre uma matriz substancialmente desgastada, com as redes interdendríticas de carbonetos eutéticos sobressaindo do plano da matriz. Em frações intermediárias (~ 28 a 30 %), o relevo se torna mais raso e uniforme, com sulcos menos profundos e poucos lascamentos. Em frações mais altas ($\gtrsim 40$ %), os carbonetos primários passam a lascar localmente, gerando cavidades pontuais sobrepostas ao sulcamento de fundo. Esses três regimes constituem a referência qualitativa central para a discussão apresentada no Capítulo 4.

Além do efeito da fração de carbonetos, a coesão da interface carboneto-matriz e a orientação dos carbonetos em relação ao deslizamento são moduladores adicionais do comportamento ao desgaste, conforme apontado por Doğan, Hawk e Laird (1997) e Penagos *et al.* (2015). Esses moduladores retornam, com maior detalhe, na discussão dos resultados.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem predominantemente qualitativa, apoiada por análises quantitativas de parâmetros morfológicos e topográficos obtidos por processamento digital de imagens. O trabalho teve como objetivo analisar a relação entre a microestrutura óptica segmentada e a topografia local de ferros fundidos brancos alto cromo com diferentes graus de euteticidade, utilizando imagens e mapas de altura obtidos por microscopia confocal.

A metodologia compreendeu a análise de amostras previamente submetidas ao ensaio de abrasão por roda de borracha, a aquisição de imagens das superfícies desgastadas e de seus respectivos mapas de altura, a segmentação digital dos carbonetos, a extração de descritores morfológicos, o nivelamento topográfico e a elaboração de sobreposições entre microestrutura e relevo. As etapas executadas anteriormente e aquelas realizadas pelo autor no âmbito deste trabalho são distinguidas ao longo deste capítulo.

3.1 Amostras estudadas

Foram analisadas quatro amostras de ferro fundido branco alto cromo (FFAC), identificadas como A, B, C e D, pertencentes à Classe III A da norma ASTM A532 (ASTM INTERNATIONAL, 2019). As amostras representam diferentes graus de euteticidade, compreendendo duas ligas hipoeutéticas, uma liga quase-eutética e uma liga hipereutética.

As amostras integram um conjunto experimental produzido previamente em pesquisa em andamento sob responsabilidade do professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo. A fabricação das ligas, o tratamento térmico, a preparação dos corpos de prova e os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados anteriormente e não fizeram parte do escopo experimental deste trabalho.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de abrasão a três corpos em abrasômetro do tipo roda de borracha, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM G65 (ASTM INTERNATIONAL, 2021). Os ensaios foram realizados nas instalações do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), em Belo Horizonte, MG. Após essa etapa, as quatro amostras foram disponibilizadas ao autor já ensaiadas, contendo as respectivas pistas de desgaste.

A execução do ensaio de roda de borracha e a determinação de perda de massa, perda volumétrica ou taxa de desgaste não foram realizadas no âmbito deste trabalho. Os parâmetros operacionais dos ensaios anteriores foram disponibilizados pelo pesquisador responsável pelo conjunto experimental e são apresentados na seção 3.2 apenas para documentar as condições em que as pistas de desgaste foram produzidas.

Os dados de composição química e as micrografias ópticas de referência também foram disponibilizados pelo pesquisador responsável pelo conjunto experimental. As micrografias de referência não foram adquiridas pelo autor e foram empregadas somente como apoio para a identificação das fases e para a classificação microestrutural das ligas.

A composição química das quatro ligas, expressa em percentual de massa, é apresentada na Tabela 1. Os teores de cromo, manganês, silício, níquel, fósforo, enxofre e nióbio permanecem em faixas próximas entre as ligas. O principal parâmetro que diferencia as composições é o teor de carbono, que varia de 2,57% a 3,36% e influencia a classificação das ligas quanto à euteticidade.

Tabela 1 – Composição química das ligas estudadas e classificação quanto à euteticidade (% em massa).

Liga	C	Cr	Nb	Mn	Si	Ni	P	S	Classe
A	2,57	25,17	0,54	1,10	0,46	0,55	0,028	0,010	Hipoeutética
B	2,72	24,92	0,52	1,08	0,46	0,50	0,024	0,008	Hipoeutética
C	3,09	25,37	0,53	1,13	0,47	0,54	0,025	0,009	Quase-eutética
D	3,36	25,45	0,54	1,14	0,48	0,54	0,023	0,009	Hipereutética

Fonte: Dados de composição química disponibilizados pelo professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo, responsável pelo conjunto experimental; classificação quanto à euteticidade elaborada pelo autor, 2026.

A classificação adotada baseia-se na posição da composição de cada liga em relação à condição eutética do sistema Fe–Cr–C para teores de cromo próximos a 25%. As ligas A e B foram classificadas como hipoeutéticas; a Liga C, como quase-eutética; e a Liga D, como hipereutética.

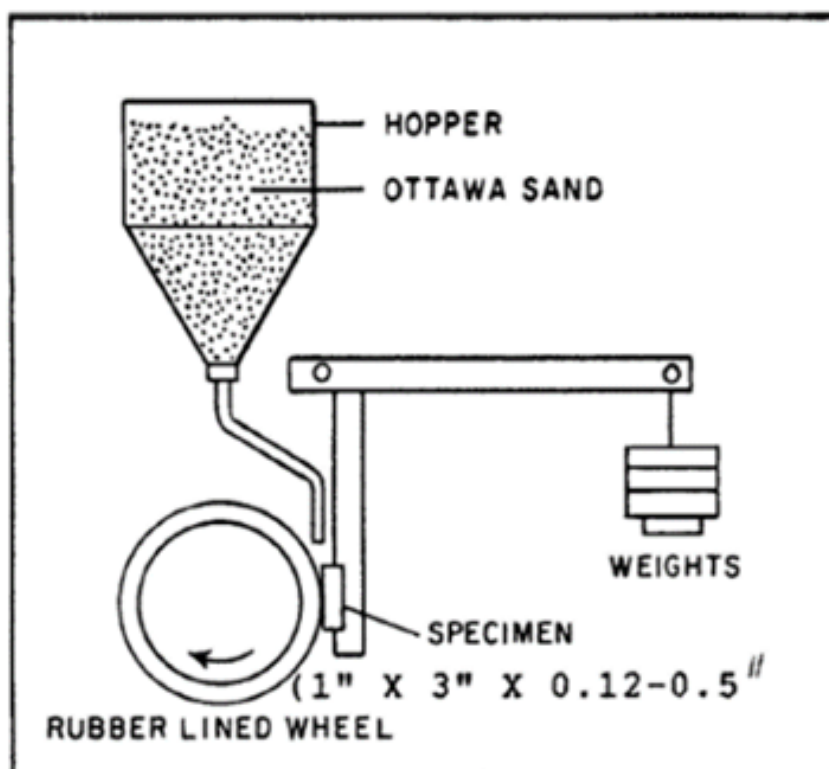
No âmbito deste trabalho, o autor realizou a aquisição das imagens das superfícies desgastadas e dos respectivos mapas de altura por microscopia confocal, utilizando o equipamento Olympus DSX1000 nas instalações do SENAI, em Itaúna, MG. Também foram realizados pelo autor o processamento digital das imagens no *Fiji/ImageJ*, a segmentação dos carbonetos M_7C_3 , a extração dos descritores morfológicos, o nivelamento topográfico, a elaboração das sobreposições e a análise qualitativa da relação entre microestrutura e relevo local. Esses procedimentos são detalhados nas seções seguintes.

3.2 Aquisição das imagens e mapas de altura

Para documentar as condições em que as pistas de desgaste foram produzidas, são apresentados os parâmetros operacionais informados pelo pesquisador responsável pelo conjunto experimental. Os ensaios de abrasão a três corpos foram realizados anteriormente ao início deste trabalho, em abrasômetro do tipo roda de borracha localizado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), em Belo Horizonte, MG, conforme a configuração da norma ASTM G65 (ASTM INTERNATIONAL, 2021). A configuração básica desse ensaio é apresentada na Figura 8.

O ensaio foi realizado com carga normal de 130 N, aplicada como peso morto, rotação constante de 200 rpm e roda revestida com borracha de clorobutil com dureza de 60 Shore A.

Figura 8 – Representação esquemática do ensaio de abrasão por roda de borracha com areia seca na configuração vertical.



Fonte: Adaptado de Figueiredo Neto (2017).

Entre o corpo de prova e a roda foi introduzido um fluxo abrasivo de 316 g/min de areia normal brasileira número 100, com material retido entre peneiras de abertura nominal de 0,30 mm e 0,15 mm.

Esses parâmetros são apresentados exclusivamente para documentar as condições de obtenção das pistas de desgaste. A execução do ensaio de roda de borracha e a determinação de perda de massa, perda volumétrica ou taxa de desgaste não foram realizadas pelo autor e não integraram o escopo experimental deste trabalho.

No âmbito deste trabalho, o autor realizou a aquisição das imagens das superfícies desgastadas e dos respectivos mapas de altura por microscopia confocal no equipamento Olympus DSX1000, nas instalações do SENAI, em Itaúna, MG. O equipamento registra simultaneamente a imagem óptica da superfície e o mapa de altura ponto a ponto. Dessa forma, a mesma aquisição forneceu a base para a segmentação dos carbonetos e para a análise topográfica, assegurando que as informações microestruturais e topográficas fossem provenientes da mesma região medida.

As micrografias ópticas de referência apresentadas no Capítulo 4 foram produzidas em etapa experimental anterior e disponibilizadas pelo professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo. Essas imagens não foram adquiridas pelo autor e foram utilizadas apenas como apoio para a identificação da matriz, do constituinte eutético e dos carbonetos primários. No âmbito deste trabalho, foram realizadas somente as anotações, a organização e a montagem das micrografias

para apresentação e discussão.

Para permitir a comparação entre as ligas, as regiões de interesse obtidas no Olympus DSX1000 foram padronizadas por meio de recortes com dimensões equivalentes, resultando em tamanho final comum de 1560×1160 px.

3.3 Segmentação binária

A separação entre matriz e carbonetos M_7C_3 requer máscara binária robusta. Empregou-se, neste trabalho, a limiarização automática de Otsu sobre a luminância das imagens das superfícies desgastadas, conforme rotinas padrão do Fiji/ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2012). A máscara resultante atribui valor 1 aos pixels classificados como carboneto e 0 aos pixels classificados como matriz, convenção mantida em todas as análises subsequentes.

3.4 Métricas microestruturais

A análise da microestrutura segmentada utiliza dois conjuntos complementares de métricas, com funções distintas. O primeiro conjunto opera por janelas locais sobre as imagens das superfícies desgastadas. Nesse procedimento, a região de interesse é dividida em janelas quadradas de 64 pixels (cerca de $10,24 \times 10,24 \mu\text{m}$). Para cada janela registram-se a fração local de carbonetos, a altura média z e a altura residual z_{resid} (definida na Seção 3.5), a rugosidade local S_a (média aritmética dos desvios em relação à média) e S_q (média quadrática), a inclinação média da superfície e a curvatura absoluta. Esse primeiro conjunto tem como finalidade relacionar, em uma mesma região da imagem, a fração local de carbonetos com as variações de relevo da superfície.

O segundo conjunto opera no nível do carboneto individual, a partir das máscaras binárias geradas pela segmentação. Com a rotulação em componentes conexos da máscara, cada carboneto recebe um conjunto de descritores morfológicos que incluem área, diâmetro equivalente, perímetro, circularidade, razão de aspecto, excentricidade, solidez e orientação principal. Enquanto a área e o diâmetro equivalente descrevem o porte dos carbonetos, a circularidade, a razão de aspecto, a excentricidade e a solidez descrevem aspectos de forma, alongamento e compacidade. Esse conjunto permite comparar a morfologia dos carbonetos entre as ligas sem recorrer a análises avançadas de distribuição espacial, que ficam fora do escopo adotado.

3.5 Nivelamento topográfico

O mapa de altura $z(x, y)$ de cada amostra apresenta uma tendência global associada à geometria da pista desgastada, além de eventuais curvaturas residuais. Para isolar a variação local da superfície, dois modelos foram avaliados, conforme apresentado nas Equações (2.1) e (2.2) do Capítulo 2. O ajuste dos coeficientes utiliza regressão robusta de Huber, que limita a influência de pontos atípicos, como sulcos profundos e protruções, sobre os coeficientes do

modelo. A escolha entre o modelo plano e o quadrático segue um critério de validação cruzada espacial em cinco dobras, no qual o modelo quadrático é adotado apenas quando reduz o erro absoluto médio em pelo menos 5 % frente ao plano, mantendo-se o plano nos demais casos. A altura residual $z_{\text{resid}}(x, y)$ obtida pela subtração da tendência ajustada é a quantidade efetivamente sobreposta à microestrutura nas análises subsequentes.

3.6 Visualizações geradas

A partir dos mapas de altura nivelados, foram geradas, para cada liga, três visualizações topográficas e uma sobreposição. As três visualizações topográficas mostram a malha original em paleta *viridis*, a tendência ajustada em paleta *magma* e a malha corrigida em paleta divergente *coolwarm*, acompanhadas de um perfil horizontal central que evidencia a remoção da tendência. A sobreposição usa a própria imagem da superfície desgastada como fundo, com a altura residual aplicada por cima em *coolwarm* semitransparente, o que permite cruzar carbonetos, matriz e eventuais defeitos com as zonas mais altas ou mais baixas do relevo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos para as quatro ligas estudadas, organizados em três frentes complementares. A Seção 4.1 apresenta as imagens, as máscaras segmentadas e as métricas morfológicas dos carbonetos. A Seção 4.2 discute a correção dos mapas de altura. A Seção 4.3 reúne a sobreposição entre microestrutura e topografia e a análise qualitativa do relevo de cada liga, com apoio da literatura de desgaste abrasivo.

4.1 Caracterização microestrutural

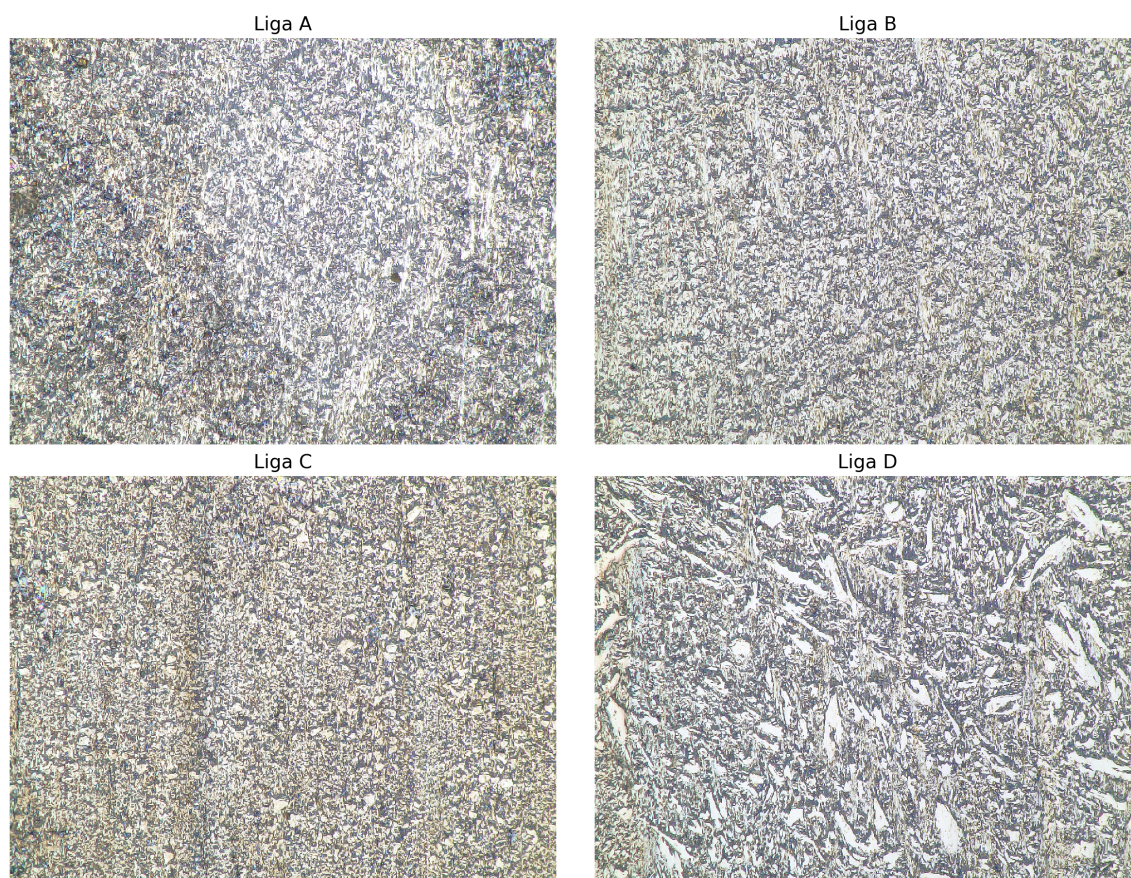
A Figura 9 reúne, em mosaico, as imagens das superfícies desgastadas das quatro ligas no recorte central de 1560×1160 px, utilizado para padronizar a escala de comparação. A Figura 10 apresenta, na mesma escala, as máscaras binárias obtidas por limiarização de Otsu. Nas imagens e nas máscaras, as regiões claras correspondem aos carbonetos e as regiões escuras correspondem à matriz.

A Liga A apresenta grandes regiões de matriz intercaladas por colônias eutéticas, caracterizando uma microestrutura hipoeutética (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000). A Liga B mantém o mesmo padrão geral, mas com regiões de matriz visivelmente menores e maior densidade local de carbonetos. A Liga C apresenta uma microestrutura mais contínua, próxima do padrão eutético, sem grandes dendritas de matriz nem carbonetos primários facilmente identificáveis. A Liga D, por sua vez, apresenta carbonetos primários grandes, hexagonais ou agulhares, envolvidos pelo constituinte eutético, padrão típico de ligas hipereutéticas (DURMAN, 1985; WIENGMOON, 2011).

A Tabela 2 traduz parte dessas diferenças visuais em parâmetros quantitativos. A fração de carboneto segmentada varia entre 0,47 e 0,53 entre as quatro ligas. Essa variação é modesta e deve ser interpretada como resultado comparativo da mesma rotina de segmentação, e não como fração volumétrica absoluta dos carbonetos. Parte dessa limitação decorre do uso do limiar de Otsu, que tende a posicionar a separação entre fases próxima da mediana da imagem e pode suavizar diferenças reais entre as amostras.

O diâmetro equivalente mediano permaneceu entre 2,47 e 2,65 μm , valor da mesma ordem reportada por Zum Gahr e Eldis (1980) para ferros fundidos alto cromo da Classe III A com cerca de 25 % de cromo. A circularidade mediana variou entre 0,51 na Liga C e 0,58 na Liga B, intervalo compatível com seções bidimensionais de carbonetos eutéticos cortados em diferentes orientações (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000). Assim, a Tabela 2 deve ser entendida como uma forma de comparar tamanho e forma aparentes dos carbonetos no campo analisado.

Figura 9 – Imagens das superfícies desgastadas das ligas A, B, C e D, recortadas para o mínimo comum de 1560×1160 px. Os carbonetos M_7C_3 aparecem em tons claros e a matriz, em tons escuros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

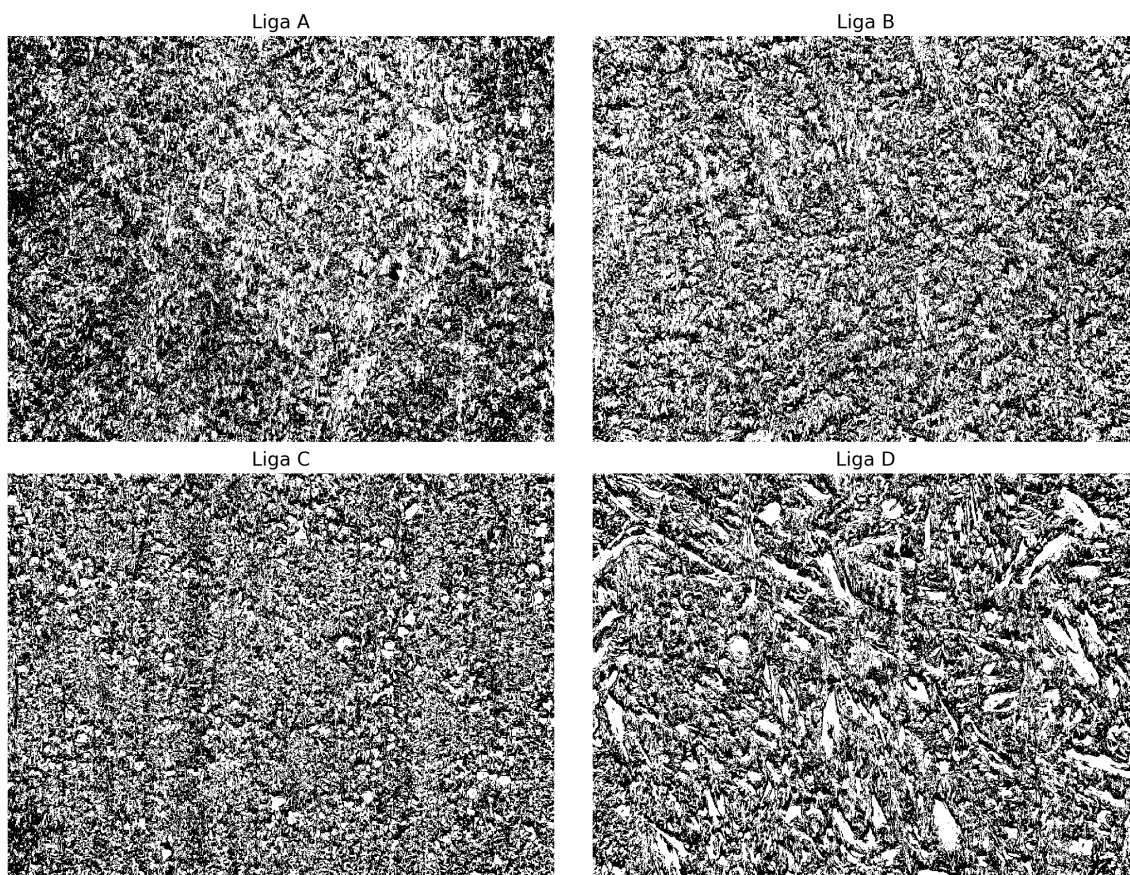
Tabela 2 – Métricas microestruturais medianas obtidas por segmentação.

Liga	Fração de C	N	D_{eq} (μm)	Circularidade	Razão asp.	Solidez
A	0,474	2124	2,52	0,525	1,95	0,667
B	0,534	1414	2,47	0,582	1,97	0,708
C	0,479	2342	2,65	0,513	1,97	0,681
D	0,513	1862	2,57	0,561	2,10	0,704

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nota: N corresponde ao número de carbonetos detectados na região de interesse completa.

Figura 10 – Máscaras binárias obtidas por limiarização de Otsu sobre a luminância das imagens da Figura 9. Os pixels brancos correspondem aos carbonetos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.2 Nivelamento topográfico

O nivelamento topográfico foi aplicado aos mapas de altura das superfícies desgastadas, com o objetivo de remover tendências globais de inclinação e curvatura associadas ao posicionamento da amostra e à geometria da própria pista. Removida essa tendência, a altura residual passa a representar o relevo deixado pela abrasão, que é a grandeza comparada com a microestrutura segmentada.

A Tabela 3 mostra que as Ligas A, B e C foram melhor descritas por um modelo plano, enquanto a Liga D exigiu modelo quadrático. Isso significa que, para A, B e C, a tendência global da superfície pôde ser representada adequadamente por uma inclinação simples. No caso da Liga D, o modelo quadrático apresentou ganho relevante por acomodar uma curvatura residual mais complexa, provavelmente associada ao micro-lascamento de carbonetos primários, com formação de pequenas crateras na pista desgastada.

Esse resultado não deve ser interpretado como evidência direta de maior ou menor desgaste de uma liga. Ele indica apenas qual modelo matemático representou melhor a tendência global do mapa de altura antes da análise do relevo local. O critério automático de seleção, baseado na redução do erro absoluto médio em validação cruzada espacial, evitou o uso desnecessário do modelo quadrático quando o plano foi suficiente.

Tabela 3 – Modelo de nivelamento topográfico escolhido por liga por regressão de Huber com validação cruzada espacial.

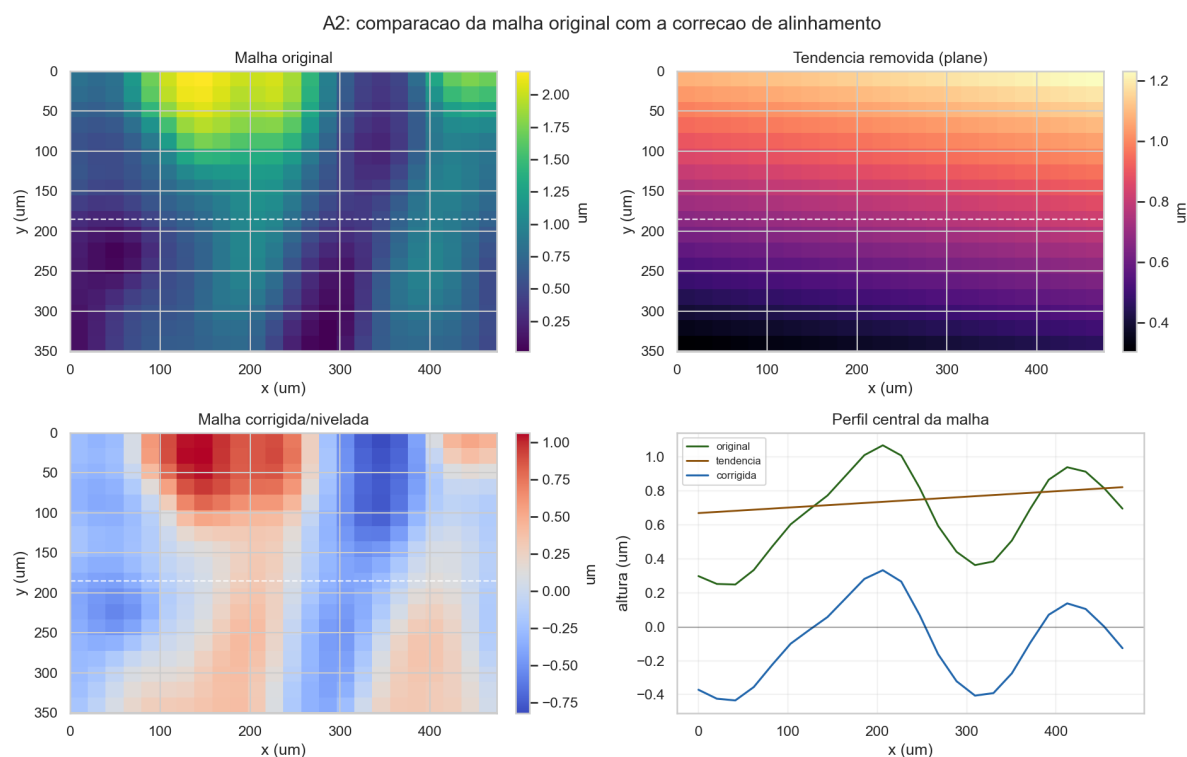
Liga	Modelo	Inclinação bruta (°)	MAE (μm)	RMSE (μm)	CV MAE (μm)
A	Plano	0,10	0,318	0,395	0,357
B	Plano	0,22	0,117	0,159	0,124
C	Plano	1,63	0,413	0,663	0,453
D	Quadrático	0,90	0,491	0,651	0,529

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nota: MAE: erro absoluto médio; RMSE: raiz do erro quadrático médio; CV MAE: erro absoluto médio da validação cruzada espacial. A inclinação bruta corresponde à inclinação da superfície antes do nivelamento.

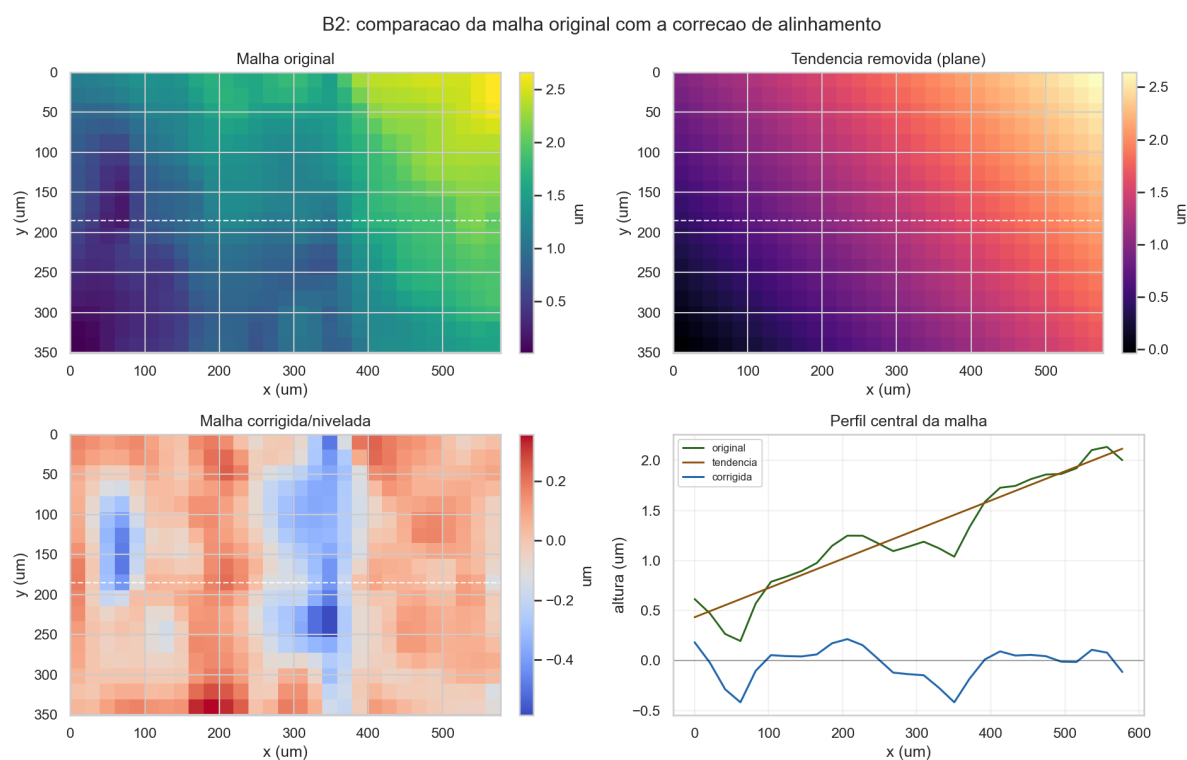
As Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam, para cada liga, a malha original $z(x, y)$, a tendência ajustada $z_{tend}(x, y)$ e a malha corrigida $z_{resid}(x, y)$. O perfil horizontal central ajuda a visualizar o efeito do nivelamento. Em todas as ligas, a malha corrigida ficou centrada próxima de zero, indicando que a tendência global foi removida. A partir desse ponto, a grandeza de interesse passa a ser a altura residual, isto é, a variação local da superfície após a correção.

Figura 11 – Liga A: malha original z , tendência plana ajustada e malha corrigida z_{resid} . O perfil central destaca a remoção da inclinação.



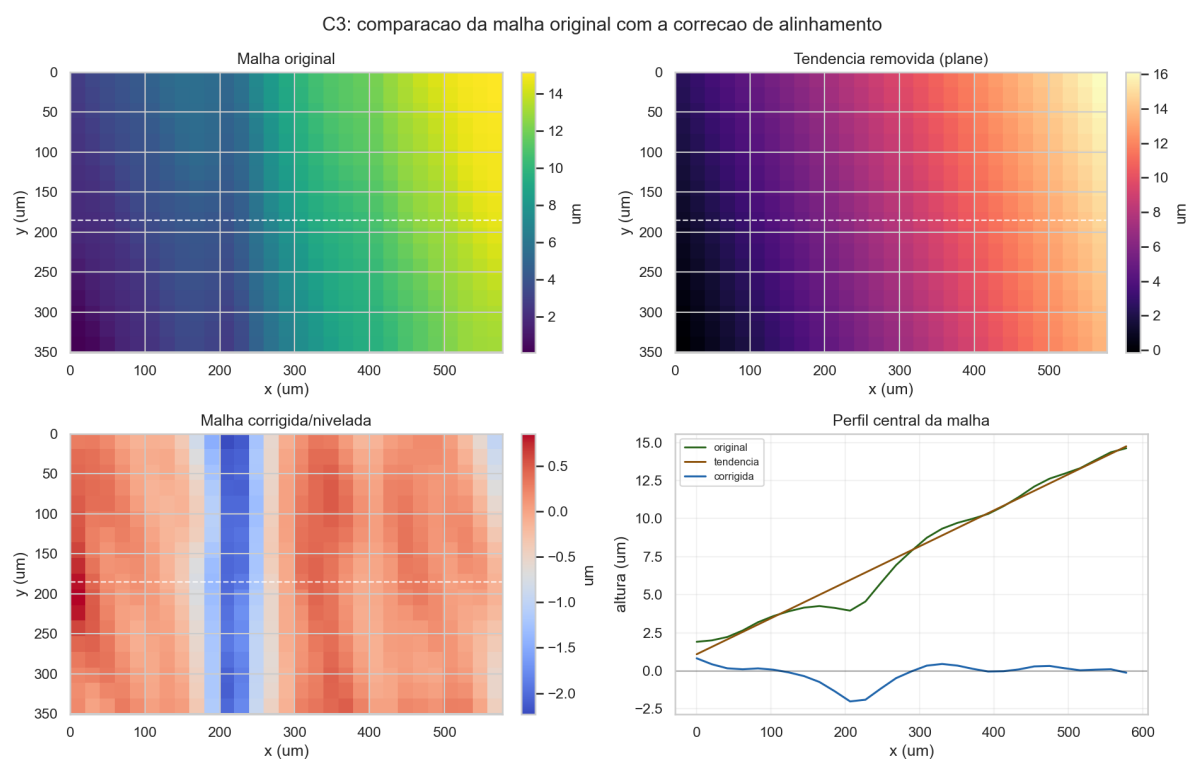
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 12 – Liga B: malha original, tendência plana e malha corrigida.



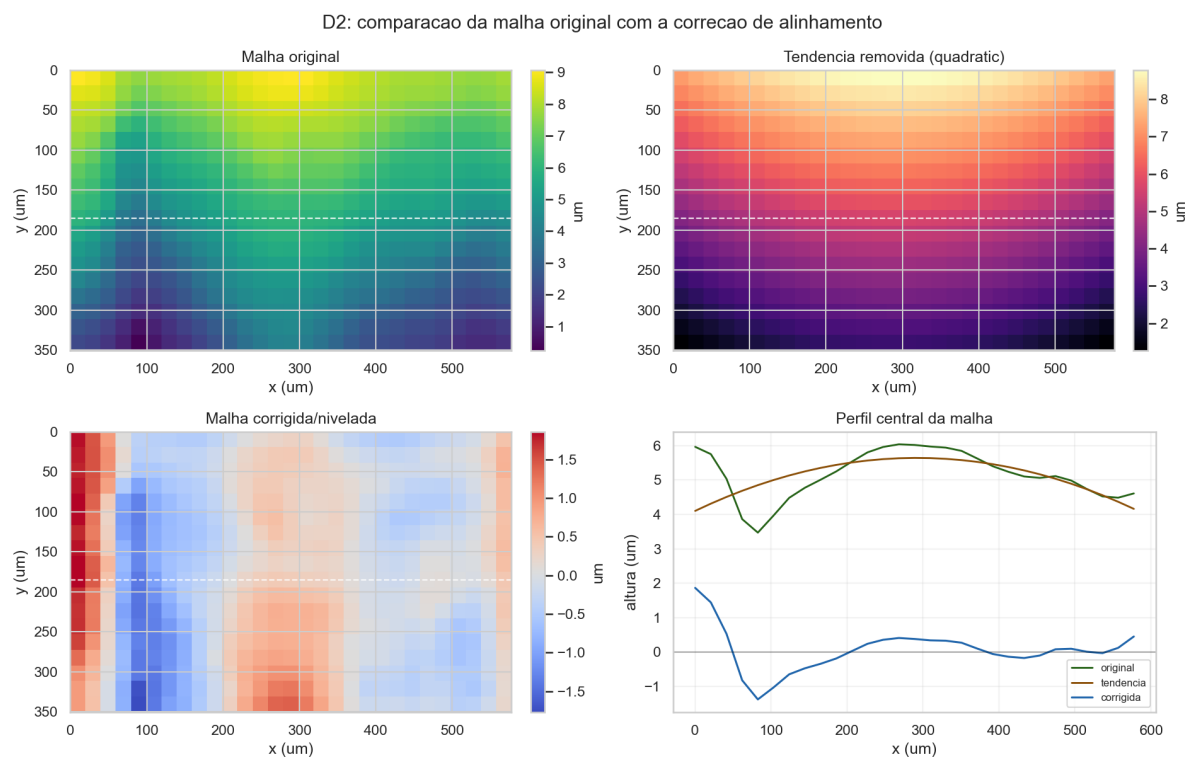
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 13 – Liga C: malha original, tendência plana e malha corrigida.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 14 – Liga D: malha original, tendência quadrática e malha corrigida. A curvatura residual da superfície é absorvida pelo modelo quadrático.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

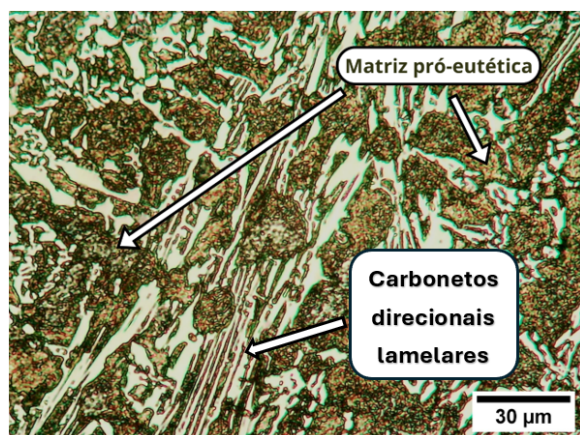
4.3 Sobreposição microestrutura-topografia e análise qualitativa do relevo

A leitura conjunta entre microestrutura e relevo apoia-se em duas formas de visualização com funções distintas. A Figura 15 apresenta as micrografias ópticas de referência de amostras representativas das mesmas quatro ligas e composições químicas analisadas neste trabalho. Essas micrografias foram obtidas após preparação metalográfica e ataque químico, em condição anterior ao ensaio de desgaste por roda de borracha, e foram cedidas pelo professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo para utilização neste estudo.

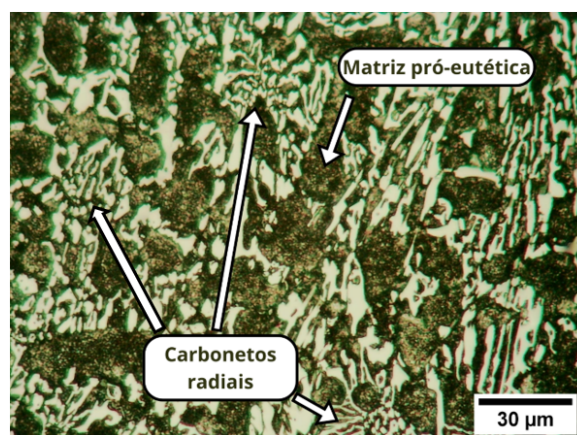
As imagens foram empregadas como referência para a identificação da matriz pró-eutética, do constituinte eutético e dos carbonetos primários, bem como para a classificação microestrutural das ligas. Dessa forma, elas representam a microestrutura das ligas antes do desgaste, enquanto as imagens e os mapas de altura analisados nas etapas seguintes correspondem às superfícies após o ensaio de roda de borracha.

A Figura 16, por sua vez, apresenta a sobreposição do mapa de altura residual à imagem da superfície desgastada de cada liga, permitindo comparar, na região analisada, a posição dos carbonetos e da matriz com as variações locais de relevo da pista de desgaste.

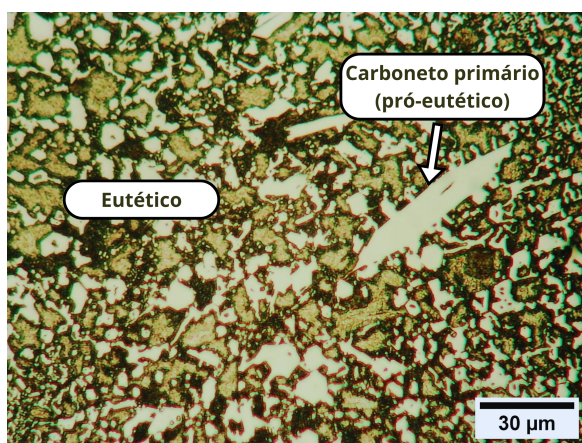
Figura 15 – Micrografias ópticas de referência das quatro ligas, produzidas em etapa experimental anterior e disponibilizadas ao autor: (a) Liga A, (b) Liga B, (c) Liga C e (d) Liga D.



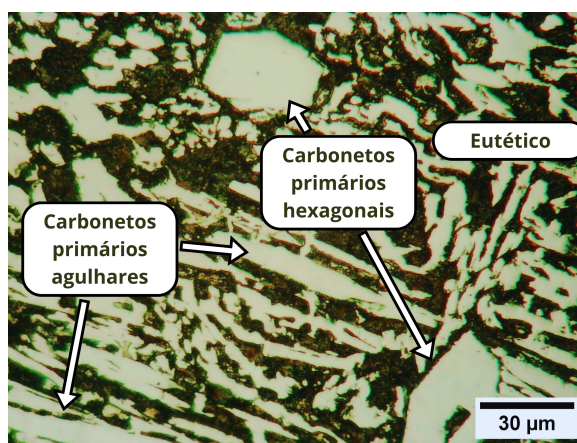
(a) Liga A



(b) Liga B



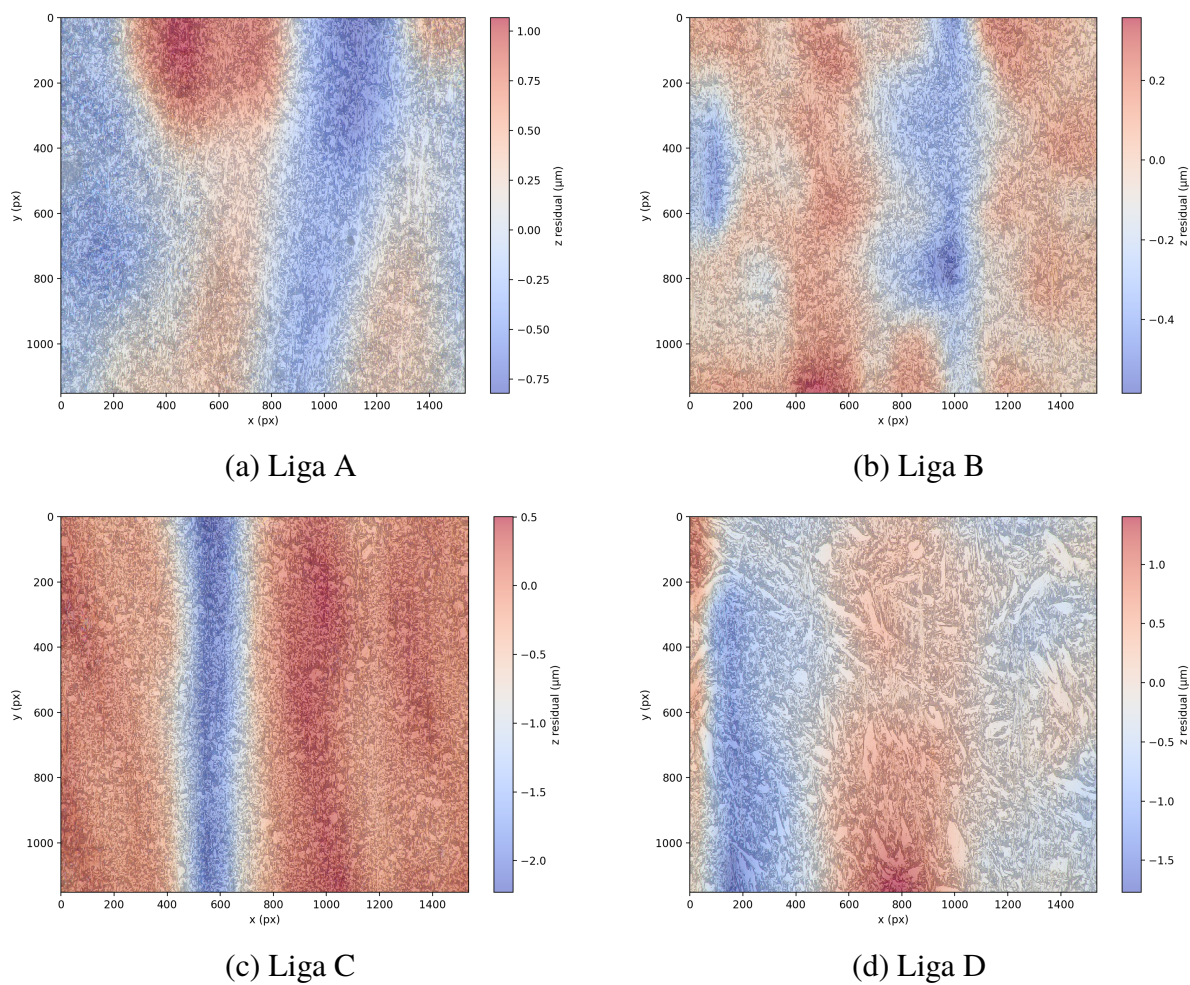
(c) Liga C



(d) Liga D

Fonte: Micrografias cedidas pelo professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo; anotações, organização e montagem elaboradas pelo autor, 2026.

Figura 16 – Sobreposição do mapa de altura residual sobre a imagem da superfície desgastada da pista de ensaio de roda de borracha: (a) Liga A, (b) Liga B, (c) Liga C e (d) Liga D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nas sobreposições, as regiões em vermelho representam pontos relativamente mais altos após o nivelamento, ou seja, protrusões em relação à tendência removida, e as regiões em azul representam pontos mais baixos, ou seja, depressões. A leitura das cores se refere sempre à altura residual, e não à altura bruta original da superfície.

Uma condição comum às amostras precisa ser fixada antes da leitura individual. No ensaio de roda de borracha, a areia de quartzo tem dureza da ordem de 1000 HV, inferior à dos carbonetos M_7C_3 , próxima de 1800 HV (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Nessa condição, matriz e carboneto são removidos a taxas comparáveis, e o relevo medido não resulta da protrusão de carbonetos isolados, mas de uma organização em escala maior que a do carboneto individual (ZUM GAHR, 1987).

Nas ligas hipoeutéticas A e B (Figura 16(a) e (b)), os carbonetos eutéticos formam redes interdendríticas entre as dendritas de matriz proeutética, visíveis na Figura 15(a) e (b) como carbonetos direcionais lamelares e radiais envoltos pela matriz pró-eutética. A altura residual acompanha a alternância entre regiões ricas em carboneto e corredores de matriz, sem corresponder a partículas individuais. A liga B apresenta o relevo mais homogêneo do conjunto, com o menor erro de nivelamento da Tabela 3, de $0,117 \mu\text{m}$. Esse comportamento decorre da intercalação mais fina entre colônias eutéticas duras e corredores de matriz tenaz, que faz a superfície responder como um composto único, ao mesmo tempo duro e tenaz, no qual as colônias resistem à penetração e a matriz acomoda a deformação (LAIRD; GUNDLACH; RÖHRIG, 2000; PENAGOS *et al.*, 2015). O resultado concorda com a observação de que o arranjo entre fase dura e matriz pesa mais que a fração isolada de carbonetos no comportamento abrasivo (ZUM GAHR; ELDIS, 1980).

A liga C, quase-eutética (Figura 15(c)), exibe a microestrutura mais fina e contínua, com eutético predominante e apenas carbonetos primários ocasionais. O mapa de altura residual (Figura 16(c)) apresenta os sulcos mais profundos e contínuos do conjunto, com a maior amplitude de relevo e os maiores erros de nivelamento da Tabela 3. O resultado indica que o refino microestrutural não protegeu a superfície. Como a partícula abrasiva é muito maior que a unidade microestrutural, ela solicita o conjunto de carboneto e matriz, e os carbonetos finos são removidos junto com a matriz, de modo que o sulcamento atravessa o campo sem ser interrompido pelas colônias (ZUM GAHR, 1987; CORONADO; SINATORA, 2009).

Na liga D, hipereutética (Figura 15(d)), os carbonetos primários grandes, hexagonais e agulhares, aparecem envolvidos pelo eutético. No mapa de altura residual (Figura 16(d)), esses carbonetos não se destacam como protrusões sustentadas, e o relevo organiza-se em bandas de maior escala atravessando carboneto e matriz. O relevo é mosqueado, sem o sulcamento contínuo da liga C. Onde ocorre ruptura local, há indícios de micro-lascamento dos carbonetos primários, com pequenas crateras associadas à fratura da fase frágil e da interface carboneto-matriz (ZUM GAHR; ELDIS, 1980). A necessidade de modelo quadrático no nivelamento dessa liga (Tabela 3) é coerente com um relevo de maior escala e mais heterogêneo.

A leitura conjunta das quatro ligas mostra que a variação do teor de carbono entre

2,57 % e 3,36 % alterou tanto a microestrutura quanto a forma como o relevo da superfície desgastada se organiza. A liga B deu o relevo mais liso, a liga C o sulcamento mais profundo e contínuo, e a liga D um relevo mosqueado com micro-lascamento dos carbonetos primários. Essa leitura é qualitativa e descreve o relevo das superfícies desgastadas a partir da combinação entre microestrutura segmentada e altura residual nivelada, sem quantificar taxa nem volume de desgaste, grandezas que dependeriam de ensaios complementares de perda de massa ou perfilometria de referência.

5 CONCLUSÃO

5.1 Principais conclusões

O presente trabalho analisou, de forma integrada, a microestrutura óptica segmentada e o relevo nivelado das superfícies desgastadas de quatro ferros fundidos alto cromo com teores de carbono entre 2,57 % e 3,36 %, mantendo os demais elementos de liga em faixas próximas. As imagens e os mapas de altura foram obtidos por microscopia confocal sobre as pistas do ensaio de roda de borracha, e a segmentação por limiarização de Otsu permitiu separar matriz e carbonetos M_7C_3 e extrair descritores morfológicos. As frações segmentadas variaram entre 0,47 e 0,53 e os diâmetros equivalentes medianos entre 2,47 e 2,65 μm , valores que devem ser lidos como parâmetros comparativos da mesma rotina de processamento, e não como frações volumétricas absolutas. As quatro ligas permaneceram na Classe III A da norma ASTM A532 (ASTM INTERNATIONAL, 2019) e cobriram três regimes, hipoeutético nas Ligas A e B, quase-eutético na Liga C e hipereutético na Liga D.

A análise qualitativa das sobreposições mostrou que, nas condições do ensaio, o relevo das superfícies desgastadas se organiza em escala maior que o carboneto individual e reflete o arranjo entre fase dura e matriz. A Liga B apresentou o relevo mais liso e homogêneo, associado à intercalação fina entre colônias eutéticas duras e corredores de matriz tenaz, enquanto a Liga C, quase-eutética, apresentou os sulcos mais profundos e contínuos, sinal de que a microestrutura mais fina não protegeu a superfície. A Liga D exibiu relevo mosqueado com indícios de micro-lascamento dos carbonetos primários. Esses resultados constituem evidência qualitativa da relação entre microestrutura e relevo da superfície desgastada e não substituem ensaios de perda de massa, perda volumétrica ou taxa de desgaste, necessários para conclusões definitivas sobre o desempenho das ligas.

5.2 Trabalhos futuros

A partir das observações apresentadas, propõem-se os seguintes desdobramentos para trabalhos futuros:

- a) refinar a máscara binária por meio de métodos de segmentação baseados em aprendizado profundo, com o objetivo de melhorar a delimitação dos carbonetos, reduzir as incertezas associadas ao limiar global de Otsu e tornar mais robustas as interpretações qualitativas apresentadas neste trabalho.
- b) ampliar a caracterização tribológica, incluindo o registro sistemático de variáveis como carga aplicada, tipo e granulometria do abrasivo, distância percorrida e perda de massa ou perda volumétrica. Esses dados permitiriam relacionar diretamente as métricas microestruturais e topográficas obtidas neste trabalho com indicadores quantitativos de desempenho, como a taxa e o coeficiente de desgaste.

- c) ampliar a caracterização microestrutural para além do plano bidimensional observado nas micrografias, empregando técnicas como microscopia eletrônica de varredura, análise química local por EDS e, em estudos mais avançados, microtomografia de raios X. Essas técnicas poderiam contribuir para avaliar com maior detalhe a morfologia, a conectividade e a distribuição tridimensional das colônias de carbonetos, permitindo relacionar a morfologia observada no plano de corte com a arquitetura volumétrica real da microestrutura.

REFERÊNCIAS

- ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physics**, American Institute of Physics, v. 24, n. 8, p. 981–988, 1953. Citado na página 23.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A532/A532M-10(2019): Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons**. West Conshohocken, PA, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 25, 42 e 47.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G65-16(2021): Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken, PA, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- CHEN, J. *et al.* TransUNet: transformers make strong encoders for medical image segmentation. **arXiv preprint arXiv:2102.04306**, 2021. Citado na página 21.
- CORONADO, J. J.; SINATORA, A. Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates. **Wear**, Elsevier, v. 267, n. 11, p. 2116–2121, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 40.
- DOĞAN, Ö. N.; HAWK, J. A.; LAIRD, G. Solidification structure and abrasion resistance of high chromium white irons. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Springer, v. 28, p. 1315–1328, 1997. Citado na página 24.
- DURMAN, R. W. Morphology of eutectic carbides in high chromium white irons. **British Foundryman**, v. 78, n. 7, p. 371–375, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 30.
- Figueiredo Neto, J. J. d. **Projeto, fabricação e validação de um abrasômetro roda de borracha na configuração horizontal e vertical**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28384>>. Acesso em: 20 jul. 2026. Citado na página 27.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 22, 23 e 40.
- KATO, K. Classification of wear mechanisms/models. In: STACHOWIAK, G. W. (Ed.). **Wear: Materials, Mechanisms and Practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. p. 9–20. Citado na página 22.
- LAIRD, G.; GUNDLACH, R. B.; RÖHRIG, K. K. **Abrasion-resistant cast iron handbook**. [S.l.]: American Foundry Society, 2000. Citado 9 vezes nas páginas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 30 e 40.
- PENAGOS, J. J.; ONO, F.; ALBERTIN, E.; SINATORA, A. Structure refinement effect on two and three-body abrasion resistance of high chromium cast irons. **Wear**, Elsevier, v. 340, p. 19–24, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 40.
- SCHINDELIN, J. *et al.* Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. **Nature Methods**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 7, p. 676–682, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 28 e 46.
- STACHOWIAK, G. W. **Wear: materials, mechanisms and practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. Citado na página 23.

VIÁFARA, C. C.; VALENZUELA, B.; MARTÍNEZ, F.; PENAGOS, J. J. A method to analyze wear mechanisms on worn chute lining surfaces using computer vision tools. **Tribology International**, Elsevier, v. 186, p. 108586, 2023. Citado na página 14.

WIENGMOON, A. Carbides in high chromium cast irons. **Naresuan University Engineering Journal**, v. 6, n. 1, p. 64–71, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 14, 18, 19 e 30.

XU, L.; VOSE, C.; STJOHN, D. Abrasive wear study of selected white cast irons as liner materials for the mining industry. **Wear**, Elsevier, v. 162, p. 820–832, 1993. Citado na página 14.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. [S.l.]: Elsevier, 1987. v. 10. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 40.

ZUM GAHR, K.-H.; ELDIS, G. T. Abrasive wear of white cast irons. **Wear**, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 175–194, 1980. Citado 4 vezes nas páginas 15, 23, 30 e 40.

APÊNDICE A – FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

A análise dos dados foi conduzida com auxílio das ferramentas computacionais relacionadas a seguir. O pré-processamento das micrografias e a etapa de limiarização de Otsu foram realizados no Fiji/ImageJ (SCHINDELIN *et al.*, 2012). As rotinas de quantificação morfológica por componentes conexos, o cálculo das métricas por janela e o nivelamento topográfico por regressão de Huber foram implementados em Python, com as bibliotecas numpy, pandas, matplotlib, scikit-image, scipy e seaborn. As figuras de mosaico (micrografias e máscaras) foram montadas em matplotlib com recorte central padronizado a 1560×1160 px.

ANEXO A – NORMA ASTM A532 — RESUMO DAS CLASSES

A norma ASTM A532 (ASTM INTERNATIONAL, 2019) estabelece as composições químicas e propriedades dos ferros fundidos brancos resistentes à abrasão, distribuídos em quatro classes principais: II A (ferro fundido nodular ao cromo, 11,5–14,0 % Cr); II B (cromo 14–18 %); II D (cromo 18–23 %, com adição de molibdênio); e III A (cromo 23–28 %, faixa em que se enquadram as ligas analisadas no presente trabalho). A norma especifica ainda limites para os teores residuais de manganês, silício, níquel, molibdênio, cobre, fósforo e enxofre.