



**Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**



**Natania Karoline da Vitória Machado**

**“Avaliação da sanidade e integridade microestrutural de  
ferros fundidos nodulares utilizados em ombreiras  
ferroviárias do sistema *fastclip* nas ferrovias da Vale”**

**Ouro Preto**

**2026**

**Natania Karoline da Vitória Machado**

**“Avaliação da sanidade e da integridade microestrutural  
de ferros fundidos nodulares utilizados em ombreiras  
ferroviárias do sistema *Fastclip* nas ferrovias da Vale”**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Metalurgista.

Orientadora: Dr.<sup>a</sup>. Maria Aparecida Pinto

Coorientador: Dr. Eleir Mundim Bortoleto

**Ouro Preto**

**2026**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149a Machado, Natania Karoline da Vitoria.

Avaliação da sanidade e integridade microestrutural de ferros fundidos nodulares utilizados em ombreiras ferroviárias do sistema Fastclip nas ferrovias da vale. [manuscrito] / Natania Karoline da Vitoria Machado. - 2026.

74 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.

Coorientador: Dr. Eleir Mundim Bortoleto.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Ferrovias - Trilhos - Ombreira ferroviária. 2. Ferro fundido - Metalurgia. 3. Físico-química - Metalurgia. 4. Microestrutura. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Bortoleto, Eleir Mundim. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 69

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Natania Karoline da Vitória Machado**

### **Avaliação da sanidade e integridade microestrutural de ferros fundidos nodulares utilizados em ombreiras ferroviárias do sistema fastclip nas ferrovias da Vale**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 24 de abril de 2026

#### Membros da banca

Dr.<sup>a</sup> Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Eleir Mundim Bortoleto - Coorientador - Instituto Tecnológico Vale  
Dr. Luciano de Oliveira - Vale Complexo de Tubarão  
Dr.<sup>a</sup> Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/06/2026



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/06/2026, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1128653** e o código CRC **9E5C7F75**.

## RESUMO

Os sistemas de fixação ferroviária asseguram a estabilidade e a segurança da via permanente, sendo as ombreiras componentes essenciais por ancorarem o grampo elástico ao dormente. Essas peças são fabricadas em ferro fundido nodular, cuja performance está diretamente associada à sua microestrutura, sobretudo à morfologia e sanidade dos nódulos de grafita. Este trabalho tem como objetivo avaliar a sanidade e a integridade microestrutural de ferros fundidos nodulares empregados em ombreiras de dormente ferroviários de concreto, correlacionando composição química, microestrutura e propriedades mecânicas com os requisitos normativos aplicáveis. Foram realizadas análises de composição química, metalográficas, ensaios mecânicos e estudos fractográficos em amostras fornecidas pelas ferrovias da mineradora Vale, buscando identificar fatores metalúrgicos que influenciam o desempenho e a ocorrência de falhas em serviço. Os resultados revelaram que imperfeições microestruturais, como a presença de carbonetos, grafita degenerada e descontinuidades internas, podem comprometer a confiabilidade da ombreira e reduzir sua vida útil. Como complemento às análises experimentais, foram efetuadas simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos, apenas como recurso adicional para demonstrar o efeito da microestrutura na distribuição de tensões sob carregamento mecânico uniaxial de tração. Conclui-se que o controle da composição química, do processo de nodulização e das etapas de fabricação é fundamental para garantir a integridade das ombreiras e por consequência a segurança operacional dos sistemas de fixação ferroviária.

**Palavras-chave:** Ombreira Ferroviária. Ferro Fundido Nodular. Composição Química. Microestrutura.

## ABSTRACT

Railway fastening systems ensure the stability and safety of the permanent way, with fastening shoulders being essential components because they anchor the elastic clip to the sleeper. These parts are manufactured from ductile cast iron, whose performance is directly associated with its microstructure, especially the morphology and soundness of the graphite nodules. This work aims to evaluate the soundness and microstructural integrity of ductile cast irons used in fastening shoulders for concrete railway sleepers, correlating chemical composition, microstructure, and mechanical properties with the applicable normative requirements. Chemical composition analyses, metallographic examinations, mechanical tests, and fractographic studies were carried out on samples supplied by Vale's railways, seeking to identify the metallurgical factors that influence performance and the occurrence of failures in service. The results revealed that microstructural imperfections, such as the presence of carbides, degenerated graphite, and internal discontinuities, may compromise the reliability of the fastening shoulder and reduce its service life. As a complement to the experimental analyses, numerical simulations using the Finite Element Method were performed only as an additional resource to demonstrate the effect of microstructure on stress distribution. It is concluded that controlling the chemical composition, the nodulation process, and the manufacturing stages is essential to ensure the integrity of the fastening shoulders and, consequently, the operational safety of railway fastening systems.

**Keywords:** Railway shoulder. Ductile cast iron. Chemical composition. Microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Imagem por microscopia óptica de ferro fundido nodular. Microestrutura conhecida como “olho de boi”.....	19
Figura 3. 2 - Efeito da nodularização (50%, 80% e 100%) na energia Charpy, mostrando maior tenacidade e menor temperatura de transição com maior nodularização. ....	22
Figura 4. 1 - Fluxograma das principais etapas metodológicas do estudo. ....	27
Figura 4. 2 (a) Ombreiras recebidas proveniente da EFC para análise no ITV-MI, evidenciando a presença de camada de óxido superficial; (b) vista frontal da ombreira com indicação das regiões selecionadas para a análise microestrutural. ....	28
Figura 4. 3 Ombreira fraturada proveniente da EFVM para análise no ITV-MI: (a) vista superior da peça na condição de recebimento; (b) vista inferior evidenciando a região de fratura e com elevado nível de oxidação superficial.....	29
Figura 4. 4 Superfície de fratura após o procedimento de limpeza por decapagem química em solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 20%. ....	29
Figura 5. 1 - Superfície de fratura após o procedimento de limpeza por decapagem química em solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 20%, com indicação da região de nucleação da falha. ....	34
Figura 5. 2 - Imagens da superfície de fratura obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). (a) Visão geral da região de fratura, evidenciando a morfologia global da superfície. (b) Detalhe da mesma região em maior ampliação, destacando a presença e a concentração localizada de inclusões não metálicas na superfície fraturada. ....	35
Figura 5. 3 - Imagens da superfície de fratura obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliação de 200×. (A) e (B) Regiões distintas da superfície fraturada, evidenciando a morfologia local da fratura e a elevada concentração de inclusões não metálicas distribuídas de forma heterogênea. ....	35
Figura 5. 4 - Mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) de outra área da região de fratura, mostrando a distribuição heterogênea de elementos como oxigênio, silício, alumínio, ferro e titânio, bem como a presença pontual de enxofre, indicando inclusões não metálicas concentradas em regiões específicas da superfície fraturada. ....	36
Figura 5. 5 - Mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizado na região	

de fratura, evidenciando a distribuição dos principais elementos químicos presentes na superfície fraturada, com destaque para oxigênio, silício, alumínio, ferro, titânio e traços de enxofre, associados a inclusões não metálicas. ....	37
Figura 5. 6 - Amostras preparadas para análise por microscopia óptica, evidenciando defeitos macroscópicos. ....	38
Figura 5. 7 - Defeito de fundição observado por microscópio óptico, superfície lixada até 1200#. ....	41
Figura 5. 8 - Defeito de fundição observado por microscopia óptica, superfície polida até 1µm sem ataque químico. ....	43
Figura 5. 9 - Microestrutura da ombreira ferroviária com predominância de ferrita e presença de defeitos de fundição, obtida por microscopia óptica após ataque com Picral 5%. ....	43
Figura 5. 10 - Microestrutura da ombreira ferroviária heterogênea, com presença de defeitos de fundição e grafita degenerada em uma mesma região, obtida por microscopia óptica após ataque com Picral. ....	44
Figura 5. 11 - Microestrutura da ombreira ferroviária com presença de carbonetos alinhados, identificados por microscopia óptica após ataque com Picral. ....	45
Figura 5. 12 - Microestrutura da ombreira ferroviária com grafita nodular em matriz ferrítica-perlítica (“olho de boi”), obtida por microscopia óptica após ataque com Nital 5%. ....	45
Figura 5. 13 - Macrorrechupe observado em MEV. ....	47
Figura 5. 14 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando múltiplas inclusões não metálicas associadas a regiões de grafita degenerada na microestrutura. ....	47
Figura 5. 15 - Mapeamento elementar por (EDS) realizado em região da microestrutura contendo inclusões não metálicas, evidenciando a distribuição espacial de Si, Fe, C, Ca, Al, Mg, O e Ba. ....	48
Figura 5. 16 - Imagem obtida por MEV da amostra polida e atacada, evidenciando uma inclusão não metálica de grandes dimensões, com morfologia irregular e interface bem definida com a matriz metálica. ....	49
Figura 5. 17 - Mapeamento elementar por EDS de inclusão não metálica, evidenciando a distribuição de O, Si, Al, Mg e Mn na partícula e em sua interface com a matriz metálica. ...	49
Figura 5. 18 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada evidenciando inclusão não metálica	

associada à formação local de grafita degenerada ao seu redor. ....	50
Figura 5. 19 - Mapeamento elementar por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.18, evidenciando a distribuição de O, Si, Mg, Ca e Al na partícula.....	50
Figura 5. 20 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando inclusão não metálica de morfologia alongada e irregular na microestrutura da ombreira. ....	51
Figura 5. 21 - Mapeamento elementar por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.20, evidenciando a distribuição de Mg, Si, O e Ca na partícula.....	51
Figura 5. 22 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando inclusão não metálica complexa de grandes dimensões na microestrutura da ombreira, observando-se grafita degenerada em sua região adjacente.....	52
Figura 5. 23 - Mapeamento elementar por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.22, evidenciando a distribuição dos principais elementos químicos na partícula e em sua interface com a matriz metálica.....	53
Figura 5. 24 - Imagem obtida por MEV da amostra polida e atacada, evidenciando a presença de carbonetos distribuídos na matriz metálica, com morfologia alongada e orientação variada. ....	54
Figura 5. 25 - Valores de dureza Vickers (HV) obtidos para diferentes amostras de ombreiras ferroviárias, comparados com a faixa especificada pelo fabricante, evidenciando a elevada dispersão dos resultados. ....	58
Figura 5. 26 - Resultados dos ensaios de tração das amostras de ombreiras analisadas, apresentando os valores de tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) e de tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) obtidos para cada amostra, em comparação com os limites mínimos estabelecidos pelas normas aplicáveis aos ferros fundidos nodulares. ....	59
Figura 5. 27 - Valores médios e respectivos desvios padrão das tensões de escoamento ( $\sigma_e$ ) de tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) obtidas nos ensaios de tração realizados nas amostras de ombreiras analisadas.....	60
Figura 5. 28 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados nas amostras de ombreiras analisadas, apresentando os valores de energia absorvida obtidos para cada amostra.....	61
Figura 5. 29 - (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos	

Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada. ....	63
Figura 5. 30 (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada. ....	63
Figura 5. 31 (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada. ....	64
Figura 5. 32 (a) Distribuição das tensões principais máximas. (b) Distribuição da deformação plástica equivalente na microestrutura com grafita esferoidal. ....	65
Figura 5. 33 (a) Distribuição das tensões principais máximas e (b) deformação plástica equivalente na microestrutura contendo grafita degenerada. ....	66
Figura 5. 34 (a) Distribuição das tensões principais máximas e (b) deformação plástica equivalente na microestrutura com inclusões. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Elementos químicos e seu efeito na composição de ferros fundidos nodular.....	20
Tabela 5. 1 - Composição química das ombreiras (% em peso). Os elementos marcados com asterisco correspondem aos elementos deletérios. ....	56

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

CE – Carbono Equivalente

HV - Dureza Vickers

J - Energia absorvida no ensaio de impacto Charpy

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AREMA - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEN - European Committee for Standardization

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios X

EFC - Estrada de Ferro Carajás

EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas

FEM - Finite Element Method

ISO - International Organization for Standardization

ITV- Instituto Tecnológico Vale

MEF - Método dos Elementos Finitos

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MO - Microscopia Óptica

PIM - Procedimento de Inspeção de Materiais

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1	Ferro Fundido .....	16
3.2	Ferro Fundido Nodular .....	17
3.3	Normatização da Produção do Ferro Fundido Nodular .....	17
3.4	Processo de Fabricação do Ferro Fundido Nodular .....	18
3.5	Influência da Composição Química na Nodulização .....	19
3.6	Importância da Nodulização e sua Influência nas Propriedades Mecânicas	20
3.7	Uso do Método dos Elementos Finitos na Análise da Influência Microestrutural.....	22
3.8	Sistema de Fixação Ferroviária e Função da Ombreira .....	23
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
4.1	Preparação Metalográfica.....	28
4.2	Amostragem e Caracterização das Ombreiras Fraturadas.....	28
4.3	Preparação Metalográfica.....	30
4.4	Composição Química .....	30
4.5	Ensaio Mecânicos .....	31
4.5.1	Ensaio de Dureza Vickers.....	31
4.5.2	Ensaio de Tração .....	31
4.5.3	Ensaio de Impacto Charpy .....	31
4.6	Modelagem Computacional .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
5.1	Análise da Superfície de Fratura.....	34

<b>5.2</b>	<b>Defeitos Macroscópicos .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Caracterização Microestrutural.....</b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise Microestrutural via MEV/EDS.....</b>	<b>46</b>
<b>5.5</b>	<b>Composição Química.....</b>	<b>55</b>
<b>5.6</b>	<b>Propriedades Mecânicas.....</b>	<b>58</b>
<b>5.7</b>	<b>Modelagem Computacional .....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de fixação ferroviária são essenciais para a estabilidade e a segurança da via permanente, pois asseguram a fixação dos trilhos aos dormentes e possibilitam a transmissão adequada dos esforços mecânicos gerados pelo tráfego ferroviário. Esses sistemas incluem uma variedade de componentes, como grampos, parafusos, placas de apoio, isoladores e ombreiras, cada um desempenhando funções específicas para o funcionamento geral do conjunto. Dentre esses componentes, as ombreiras ferroviárias têm um papel importante, pois fixam o grampo elástico ao dormente, fazendo a ancoragem do trilho, sendo fundamentais para a estabilidade estrutural do conjunto, conforme descrito em manuais técnicos ferroviários como o AREMA (2023).

As ombreiras ferroviárias são componentes estruturais dos sistemas de fixação da via permanente e são, em sua maioria, produzidas em ferro fundido nodular, material amplamente empregado em aplicações que demandam boa resistência mecânica, tenacidade e capacidade de dissipação de esforços. No contexto nacional, procedimentos técnicos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), como o Procedimento de Inspeção de Materiais – PIM 05 – Placa de apoio de ferro fundido nodular (2015), reconhecem esse material como adequado para componentes ferroviários submetidos a esforços estáticos e dinâmicos, estabelecendo requisitos de desempenho e integridade estrutural. Essas propriedades, contudo, dependem fortemente da microestrutura formada durante o processo de fundição, especialmente da morfologia, do tamanho, da distribuição e da sanidade dos nódulos de grafita. A integridade do material pode ser comprometida pela presença de imperfeições microestruturais, como carbonetos indesejáveis, grafita degenerada, inclusões e descontinuidades internas, o que reduz sua resistência mecânica, sua vida em fadiga e sua durabilidade em serviço (Guesser, 2019).

A relevância dessa investigação aumenta quando se considera a complexidade operacional e o elevado volume de cargas transportadas em ferrovias como as da Vale, uma das maiores operadoras logísticas do país. Nessas condições, as ombreiras ferroviárias são submetidas a solicitações mecânicas intensas e contínuas, o que evidencia a necessidade de materiais com elevada confiabilidade estrutural e qualidade microestrutural controlada. Falhas nesses componentes podem comprometer a segurança da via, causar interrupções do tráfego ferroviário e gerar custos elevados de manutenção (AREMA, 2023).

Neste cenário, o objetivo deste estudo é analisar a sanidade e a integridade microestrutural de ferros fundidos nodulares empregados em ombreiras ferroviárias do sistema

*Fastclip*, presentes nas ferrovias da Vale S.A. O estudo foi executado correlacionando a composição química, as características microestruturais e as propriedades mecânicas do material com os requisitos definidos pelas normas técnicas aplicáveis. Entender esses elementos ajuda a identificar os fatores que podem causar variações no desempenho estrutural das ombreiras e fornece suporte para melhorar as etapas de fabricação, inspeção e controle de qualidade. Além disso, foi realizada a simulação computacional considerando a aplicação de tensões uniaxiais compatível com as solicitações típicas observadas em aplicações ferroviárias permitindo a avaliação do comportamento mecânico do material em uma situação conservadora.

Desse modo, este estudo visa avaliar as causas de falhas em ombreiras dos sistemas de fixação ferroviária em dormente de concreto, auxiliando na redução de falhas prematuras, na melhoria da vida útil dos componentes e no aumento da segurança operacional das vias utilizadas pela Vale S.A.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a sanidade e a integridade microestrutural de ombreiras ferroviárias do sistema *Fastclip*, produzidas em ferros fundidos nodulares, presentes nas ferrovias da Vale S.A, correlacionando a composição química, as características microestruturais e as propriedades mecânicas do material com os requisitos estabelecidos por normas técnicas aplicáveis.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar a composição química das ombreiras ferroviárias em estudo, verificando sua conformidade com os limites estabelecidos em normas para ferros fundidos nodulares;
- Analisar a microestrutura do material, com ênfase na morfologia, distribuição, tamanho e sanidade dos nódulos de grafita, bem como na identificação de carbonetos, inclusões e demais descontinuidades;
- Avaliar a influência da microestrutura nas propriedades do material a partir de ensaios mecânicos;
- Estabelecer correlações entre composição química, microestrutura e propriedades mecânicas, identificando aspectos metalúrgicos que impactam o desempenho operacional das ombreiras;
- Verificar a conformidade dos componentes com os requisitos normativos aplicáveis, definindo critérios para aceitação ou rejeição com base na sanidade microestrutural;
- Realizar simulações numéricas complementares pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) para demonstrar o impacto da microestrutura na distribuição de tensões, reforçando a análise experimental.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Ferro Fundido

Segundo Chiaverini (2005), os ferros fundidos constituem um grupo de ligas ferro-carbono de grande relevância industrial. Essa importância decorre não apenas das características intrínsecas do material, mas também das possibilidades de aprimoramento proporcionadas pela adição de elementos de liga, pela aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular. Esses fatores ampliaram significativamente o campo de utilização dos ferros fundidos, permitindo seu emprego em aplicações que, anteriormente, eram restritas aos aços.

A partir do diagrama de equilíbrio Fe-C, Chiaverini (2005) define os ferros fundidos como ligas cujo teor de carbono excede aproximadamente 2,0%. Contudo, em função da forte influência do silício sobre a microestrutura, essas ligas são mais adequadamente classificadas como sistemas ternários Fe-C-Si. Nessas condições, parte expressiva do carbono encontra-se na forma livre, geralmente como grafita (Nunes; Kreischer, 2010). Assim, Chiaverini (2005) adota a definição de ferro fundido como uma liga ferro-carbono-silício com teor de carbono superior a 2,0%, em quantidade maior do que a retida em solução sólida na austenita, resultando na precipitação de grafita em diferentes morfologias.

Dentro dessa ampla categoria, diversos tipos de ferros fundidos são descritos por Chiaverini (2005), tais como o cinzento, o branco, o mesclado, o maleável e o de grafita compactada. Cada um deles se distingue principalmente pela morfologia da grafita e pela proporção entre carbono livre e combinado. Entretanto, para as aplicações que exigem melhor equilíbrio entre resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, destaca-se o ferro fundido nodular, também denominado ferro fundido dúctil.

O ferro fundido nodular é obtido por meio de um tratamento específico no metal líquido, tradicionalmente com a adição de elementos nodulizantes, como magnésio ou terras raras, que promovem a formação de grafita esferoidal. Essa morfologia nodular é responsável por propriedades mecânicas significativamente superiores às dos ferros fundidos convencionais com grafita lamelar ou compactada. A grafita esferoidal reduz a concentração de tensões, melhora a resistência ao impacto e aumenta a ductilidade, permitindo que o material seja empregado em componentes estruturais, peças sujeitas a cargas cíclicas e sistemas onde se exige alta confiabilidade razão pela qual seu uso substitui, em muitos casos, elementos originalmente fabricados em aço (Chiaverini, 2005).

Além disso, o ferro fundido nodular mantém características importantes dos ferros fundidos tradicionais, como boa fundibilidade, absorção de vibrações e possibilidade de ajuste de propriedades por meio de tratamentos térmicos e da adição de elementos de liga. Por apresentar esse conjunto de vantagens, o material se tornou indispensável em diversos setores industriais, incluindo o ferroviário, que é o foco deste trabalho (Guesser, 2019).

### **3.2 Ferro Fundido Nodular**

De acordo com Pero-Sanz Elorz, Fernández González e Verdeja (2018), o ferro fundido nodular, também denominado ferro fundido dúctil, caracteriza-se por apresentar uma combinação favorável de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, superior à observada nos ferros fundidos com grafita lamelar, como o ferro fundido cinzento, e nos ferros fundidos maleáveis. Esse comportamento mecânico decorre, em grande parte, da morfologia da grafita e da continuidade da matriz metálica, o que confere ao material maior capacidade de suportar solicitações mecânicas e dinâmicas em aplicações estruturais.

A principal característica microestrutural do ferro fundido nodular é a presença da grafita na forma esferoidal, resultante de condições específicas de solidificação e do uso de elementos nodulizantes, como o magnésio. Essa morfologia esférica reduz significativamente os efeitos de concentração de tensões na matriz metálica quando comparada à grafita lamelar, preservando a continuidade da matriz e contribuindo para o aumento da ductilidade e da tenacidade do material (Rundman; Iacoviello, 2016).

A matriz metálica do ferro fundido nodular pode apresentar diferentes microestruturas, como ferrítica, perlítica ou ferrítico-perlítica, em função da composição química e das condições de solidificação e tratamento térmico. Matrizes predominantemente ferríticas estão associadas a maior ductilidade e resistência ao impacto, enquanto matrizes perlíticas proporcionam maiores valores de resistência mecânica e dureza, permitindo a adequação do material a diferentes requisitos de desempenho em serviço (Rundman; Iacoviello, 2016).

### **3.3 Normatização da Produção do Ferro Fundido Nodular**

A produção de ferros fundidos nodulares é regulamentada por diferentes normas técnicas nacionais e internacionais, que estabelecem critérios para classificação do material com base, principalmente, nas propriedades mecânicas e na microestrutura associada à presença de grafita esferoidal. Dentre as normas mais utilizadas destacam-se a ASTM A536 (2023), a ISO 1083 (2018), a EN 1563 (2018) e a ABNT NBR 6916 (2018). Apesar de essas normas não

estabelecerem todos os limites de composição química de forma explícita, a Norma ASTM A536 (2023) exige, indiretamente, um controle mais rigoroso da composição química. Isso ocorre porque o cumprimento simultâneo dos requisitos de limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento demanda um controle mais preciso dos teores de carbono, silício, manganês e elementos residuais, além do grau de nodulização. Por outro lado, a Norma EN 1563 (2018), também conhecida como ENG 1563, adota uma abordagem menos rigorosa em relação à dedução do controle químico, oferecendo mais flexibilidade na composição, desde que os requisitos mecânicos mínimos sejam cumpridos.

Dessa forma, neste trabalho, a Norma ASTM A536 (2023) foi adotada como norma de referência para a análise dos resultados, pois sua aplicação demanda um controle metalúrgico mais rigoroso da composição química e da microestrutura, tornando-a mais adequada aos objetivos deste estudo.

### **3.4 Processo de Fabricação do Ferro Fundido Nodular**

Segundo Chiaverini (2005) e Pero-Sanz Elorz, Fernández González e Verdeja (2018), a composição química do ferro fundido nodular é semelhante à do ferro fundido cinzento, diferindo fundamentalmente pelo tratamento de nodulização, responsável pela modificação da morfologia da grafita. Esse tratamento promove a formação de grafita esferoidal, obtida por meio da adição controlada de elementos nodulizantes ao metal líquido, principalmente o magnésio, podendo também ser empregados, em menores proporções, elementos como o cério.

A adição do nodulizante é realizada no metal líquido, geralmente na panela de vazamento, na qual ocorre uma reação intensa associada à vaporização parcial do magnésio. Esse processo contribui para a redução do teor de enxofre do metal e altera o mecanismo de nucleação e crescimento da grafita, favorecendo um crescimento mais isotrópico, o que resulta na formação de partículas aproximadamente esferoidais. Conforme destacado por Chiaverini (2005) e Pero-Sanz Elorz, Fernández González e Verdeja (2018), essa mudança morfológica é determinante para a melhoria das propriedades mecânicas do material, uma vez que a grafita esferoidal reduz significativamente os efeitos de concentração de tensões na matriz metálica.

Para garantir a eficiência do processo de nodulização, é necessário o controle rigoroso de elementos considerados prejudiciais à formação da grafita esferoidal, tais como antimônio, chumbo, titânio, telúrio, bismuto e zircônio, os quais podem provocar degeneração da grafita ou favorecer a formação de carbonetos. Após a nodulização, é prática comum a realização da inoculação com ferro-silício (Fe–Si), com o objetivo de refinar a microestrutura, aumentar o

número de núcleos de grafita e melhorar a homogeneidade microestrutural do material (Chiaverini, 2005).

Uma microestrutura característica desse material é conhecida como “olho de boi”, na qual nódulos de grafita esferoidal são circundados por halos ferríticos em uma matriz predominantemente perlítica, conforme ilustrado na Figura 3.1. Essa morfologia microestrutural é classicamente descrita na literatura metalográfica, estando associada à nucleação preferencial da ferrita ao redor dos nódulos de grafita durante o resfriamento, conforme descrito por Colpaert (2008).

Figura 3. 1 - Imagem por microscopia óptica de ferro fundido nodular. Microestrutura conhecida como “olho de boi”



Fonte: Colpaert (2008).

### 3.5 Influência da Composição Química na Nodulização

O processo de nodulização e a obtenção da grafita esferoidal no ferro fundido nodular são fortemente influenciados pela composição química da liga, tornando essencial o controle adequado dos elementos presentes para garantir o desempenho mecânico e a sanidade microestrutural do material (Colpaert, 2008). Os principais elementos químicos comumente presentes nos ferros fundidos nodulares e seus respectivos efeitos sobre a liga estão resumidos na Tabela 3.1, a qual apresenta a influência tanto dos elementos nodulizantes quanto dos elementos considerados contaminantes ou deletérios.

De acordo com Santos, Corrêa e Lima (2022), o magnésio (Mg) desempenha papel fundamental no processo de esferoidização da grafita, sendo necessário um teor residual mínimo da ordem de 0,03% para assegurar elevados níveis de nodulização. Entretanto, a eficiência do magnésio é fortemente afetada pela presença de enxofre (S), uma vez que este

elemento reage preferencialmente com o Mg, consumindo-o e reduzindo sua disponibilidade para promover a formação da grafita esferoidal. Dessa forma, o controle do teor de enxofre no metal líquido é uma etapa crítica do processo de nodulização.

Além disso, carbono (C) e silício (Si) exercem influência direta sobre o carbono equivalente e sobre o comportamento de solidificação do ferro fundido nodular, afetando a formação da grafita. A ação conjunta desses elementos condiciona a estabilidade da grafita e a tendência à formação de estruturas ferríticas, perlíticas ou mistas, conforme discutido anteriormente. Assim, a composição química deve ser avaliada de forma integrada, considerando não apenas os teores individuais dos elementos, mas também suas interações durante a solidificação (Santos; Corrêa; Lima, 2022).

Por outro lado, a presença de determinados elementos em teores elevados ou mesmo residuais pode provocar a degeneração da grafita, comprometendo significativamente as propriedades mecânicas do material. Elementos como chumbo (Pb), bismuto (Bi), arsênio (As), telúrio (Te), antimônio (Sb) e titânio (Ti) são considerados altamente deletérios, pois interferem no mecanismo de crescimento da grafita esferoidal, favorecendo a formação de grafita irregular, compacta ou lamelar. Mesmo em concentrações muito baixas, esses elementos podem causar perda de nodularidade e redução da resistência mecânica e da ductilidade do ferro fundido nodular, o que reforça a necessidade de um controle rigoroso da composição química ao longo do processo produtivo (Souza Santos, 2000).

Tabela 3. 1 - Elementos químicos e seu efeito na composição de ferros fundidos nodular

Elemento	Função
C	Constituinte dos nódulos
Si	Grafitizante e ferritizante
Mn	Formador de perlita
P	Fragiliza a estrutura
S	Reduz nodularidade, ductilidade e tenacidade
Mg	Esfereodizante e controle de impurezas
Cr	Potente formador de carbonetos
Cu	Melhoria de resistência
Ce	Neutralizador de elementos deletério e agente de nucleação de grafite
Ni	Aumento da tenacidade
Mo	Melhoria de resistência
V	Refina o grão
Al	Melhoria da resistência e oxidação
Sn*	Reduz a resistência ao impacto
Pb	Elemento deletério
Ti*	Elemento deletério
Bi*	Elemento deletério
As*	Elemento deletério
Te*	Elemento deletério
Sb*	Elemento deletério

Fonte: Adaptada de Colpaert (2008) e Trudel; Gagné (1997).

### 3.6 Importância da Nodulização e sua Influência nas Propriedades Mecânicas

A nodulização é um dos fatores metalúrgicos mais relevantes na definição das

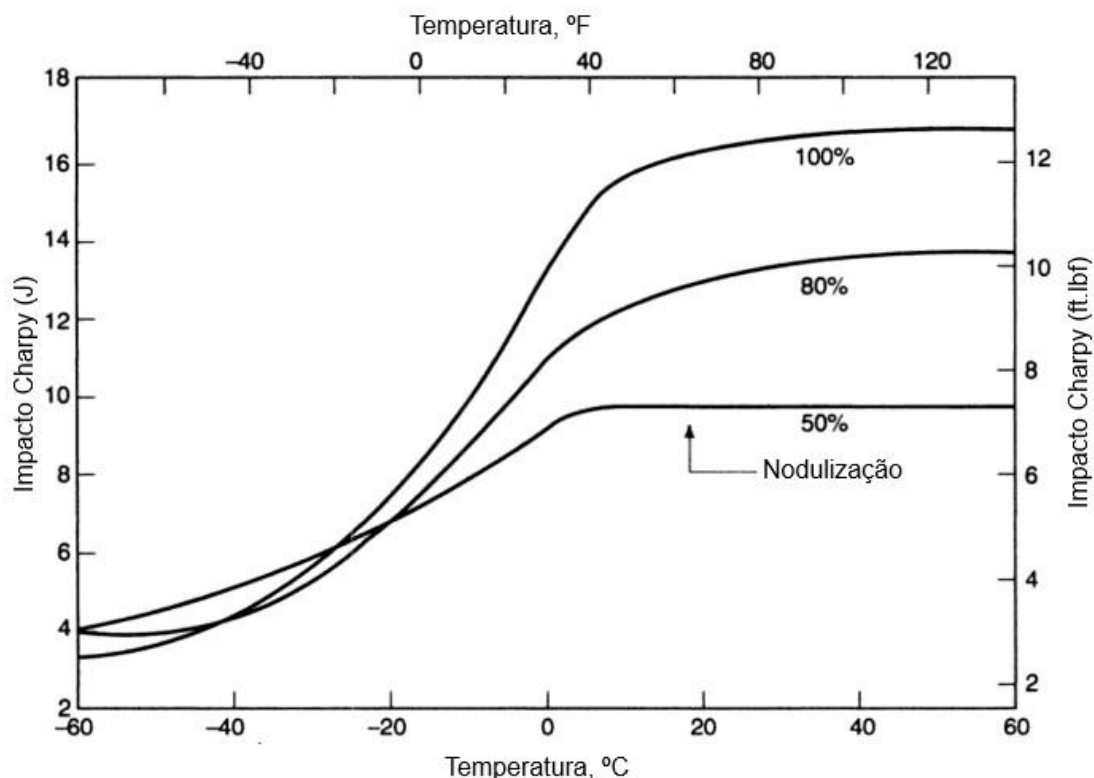
propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares, pois controla diretamente a morfologia da grafita e, conseqüentemente, o comportamento mecânico do material. Segundo Guessser (2019), a transformação da grafita da forma lamelar para a forma esferoidal reduz significativamente os efeitos de concentração de tensões na matriz metálica, uma vez que os nódulos esféricos apresentam menor severidade geométrica em comparação às lamelas. Essa característica resulta em melhorias substanciais na ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga do ferro fundido nodular, especialmente quando comparado aos ferros fundidos cinzentos.

Guessser (2019) destaca que o grau de nodulização, definido pela fração de grafita presente na forma esferoidal, exerce influência direta sobre a resistência à fratura do material. À medida que o grau de nodulização aumenta, ocorre uma redução da facilidade de propagação de trincas, pois os nódulos de grafita atuam como descontinuidades menos críticas, desviando e atenuando o avanço das trincas na matriz metálica. Dessa forma, a nodulização não apenas define a microestrutura, mas condiciona o desempenho do material sob solicitações mecânicas dinâmicas.

Essa relação é claramente evidenciada nos resultados apresentados por Davis (1996), conforme ilustrado na Figura 3.2, na qual pode-se observar a influência do grau de nodulização na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica. O gráfico indica que amostras com 100% de nodulização apresentam valores significativamente mais elevados de energia absorvida em toda a faixa de temperatura analisada, além de uma redução da temperatura de transição dúctil-frágil. Em contrapartida, materiais com 80% e 50% de nodulização exibem valores progressivamente menores de energia de impacto, evidenciando maior sensibilidade à fratura frágil, sobretudo em temperaturas mais baixas (Davis 1996).

Além disso, nota-se que a redução do grau de nodulização não só diminui a energia Charpy máxima, mas também desloca a curva de transição para temperaturas mais altas, o que indica uma perda de tenacidade. Esse comportamento está relacionado à presença de grafita degenerada ou não esferoidal, que atua como concentrador de tensões e local preferencial para a nucleação e propagação de trincas, reduzindo a resistência ao impacto do material. Esse efeito está de acordo com as observações de Guessser (2019), que destaca que até mesmo pequenas reduções no grau de nodulização podem levar a quedas significativas na tenacidade, especialmente em aplicações expostas a carregamentos dinâmicos ou baixas temperaturas.

Figura 3.2 - Efeito da nodularização (50%, 80% e 100%) na energia Charpy, mostrando maior tenacidade e menor temperatura de transição com maior nodularização.



Fonte: Adaptada de Davis (1996)

Assim, a nodularização apropriada é um fator fundamental para assegurar o desempenho mecânico do ferro fundido nodular, sendo especialmente importante para as propriedades ligadas à fratura e ao impacto. Para garantir altos valores de energia absorvida no teste Charpy e uma transição dúctil-frágil mais favorável, é essencial controlar rigorosamente o tratamento de nodularização, a composição química e o grau de nodularização final, conforme evidenciado pela literatura clássica e pelos dados consolidados por Davis (1996).

### 3.7 Uso do Método dos Elementos Finitos na Análise da Influência Microestrutural

Na literatura, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente empregado para a análise do efeito da microestrutura no comportamento mecânico dos materiais metálicos. Zienkiewicz, Taylor e Zhu (2013) ressaltam que materiais metálicos raramente podem ser considerados homogêneos em escala microscópica, uma vez que apresentam fases distintas, interfaces internas e descontinuidades microestruturais, o que compromete a hipótese de continuidade homogênea frequentemente adotada em modelos macroscópicos. De forma complementar, Callister e Rethwisch (2020) destacam que essas heterogeneidades microestruturais atuam como regiões preferenciais de concentração de tensões, influenciando

diretamente os mecanismos de deformação plástica e fratura.

Nesse contexto, as simulações numéricas baseadas no MEF permitem avaliar de maneira detalhada a redistribuição dos campos de tensão e deformação associada à presença dessas heterogeneidades, possibilitando a análise de fenômenos como deformação localizada, nucleação e propagação de trincas, de modo complementar aos ensaios experimentais (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013; Bathe, 2014).

Na literatura, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é amplamente empregado para a análise do efeito da microestrutura no comportamento mecânico dos materiais metálicos. As heterogeneidades microestruturais podem favorecer a deformação plástica localizada, a iniciação de trincas e a redistribuição não uniforme de tensões, fenômenos que podem ser avaliados de forma detalhada por meio de simulações numéricas, complementando os resultados obtidos experimentalmente (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013).

Além disso, o uso do MEF possibilita a modelagem de materiais multifásicos como sistemas não homogêneos, nos quais propriedades mecânicas distintas coexistem em um mesmo domínio (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2013). Segundo Callister e Rethwisch (2020), diferenças entre módulos elásticos e comportamentos mecânicos das fases constituintes podem gerar gradientes de tensão significativos, cuja mensuração direta por técnicas experimentais convencionais é limitada. Nesse contexto, as simulações numéricas baseadas no MEF tornam-se ferramentas fundamentais para a análise da interação entre fases e para a compreensão da distribuição interna de tensões associada à microestrutura do material.

Portanto, a literatura evidencia que o MEF constitui uma ferramenta consolidada para a análise do impacto da microestrutura na distribuição de tensões em materiais metálicos. A associação entre ensaios experimentais e simulações numéricas permite uma abordagem mais completa e fundamentada do comportamento mecânico desses materiais, contribuindo para a interpretação dos resultados experimentais e para a compreensão dos mecanismos de deformação e falha em escala microestrutural.

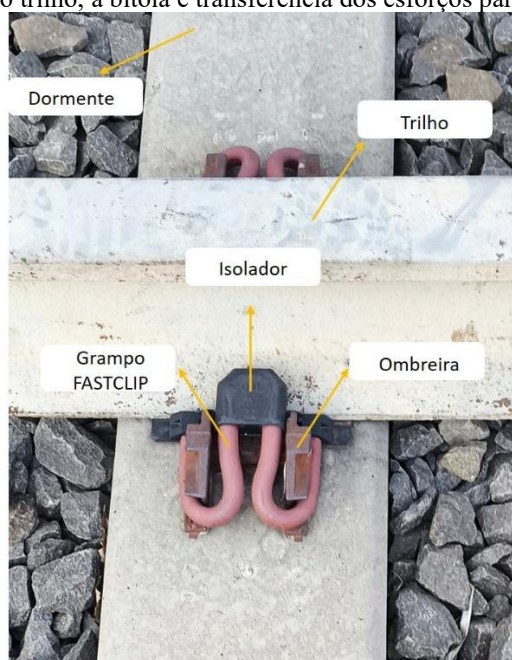
### **3.8 Sistema de Fixação Ferroviária e Função da Ombreira**

Os sistemas de fixação ferroviária constituem um conjunto de componentes responsáveis por fixar o trilho ao dormente, assegurando a estabilidade geométrica da via, a bitola e a adequada transferência dos esforços verticais, laterais e longitudinais gerados pela passagem dos veículos ferroviários. No contexto da via permanente, esses sistemas

desempenham papel fundamental na segurança operacional, pois contribuem para restringir deslocamentos indesejados do trilho, reduzir vibrações e preservar o alinhamento da via sob carregamentos cíclicos.

De acordo com o procedimento DNIT PIM 05 (2015) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), os acessórios de fixação têm a função de manter o trilho na posição correta, garantir a bitola da via e oferecer resistência aos deslocamentos longitudinal e transversal do trilho. No sistema de fixação elástica tipo *Fastclip*, o conjunto é constituído por grampo elástico, isolador frontal, isolador lateral, palmilha e ombreira, sendo que, na Figura 3.3, está representada a configuração desse sistema. Nesse conjunto, o trilho é apoiado sobre a palmilha que, por sua vez, se apoia sobre o dormente, enquanto a ombreira atua na ancoragem do grampo elástico e na transmissão dos esforços para a estrutura de apoio. De acordo com a AREMA (2023), os sistemas de fixação empregados na via permanente devem garantir a contenção do trilho, a bitola e a resistência aos esforços atuantes durante a passagem dos veículos ferroviários.

Figura 3.3. Vista do sistema de fixação ferroviária, destacando seus principais componentes: responsáveis pela ancoragem do trilho, a bitola e transferência dos esforços para o dormente.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As falhas em sistemas de fixação ferroviária podem comprometer diretamente o desempenho da via e elevar o risco operacional, uma vez que a perda de integridade de qualquer componente tende a reduzir a capacidade de contenção do trilho. Entre os principais problemas observados destacam-se a perda de força de retenção do grampo, o desgaste ou a deterioração

da região de apoio do trilho no dormente, deslocamentos excessivos, rotação do trilho, alargamento de bitola e fraturas em componentes como clips, isoladores e ombreiras (AREMA, 2023).

Em dormentes de concreto, a deterioração da região do assento do trilho pode reduzir a eficiência do sistema de fixação, favorecer o deslocamento lateral do trilho e contribuir para a instabilidade da via. No caso dos sistemas com ombreiras embutidas no dormente, a integridade mecânica e microestrutural dessas peças é essencial para o funcionamento adequado do conjunto, uma vez que elas são responsáveis pela ancoragem do grampo elástico. Assim, defeitos de fabricação, descontinuidades internas, desgaste ou fraturas podem comprometer a fixação do trilho e reduzir a confiabilidade do sistema, tornando indispensável o controle dos materiais, do processo de fabricação e das condições de serviço para garantir desempenho, durabilidade e segurança operacional da via permanente (DNIT PIM05, 2015; AREMA, 2023).

Nesse contexto, de acordo com a AREMA (2023), a ombreira desempenha papel fundamental no desempenho estrutural do sistema, atuando como elemento de apoio e ancoragem do grampo elástico, além de participar da transferência e da distribuição dos esforços do trilho para o dormente. Em conjunto com os demais componentes do sistema de fixação, esse elemento contribuiu para a resistência às cargas verticais (considerada para o trem parado), aos esforços verticais, laterais e longitudinais (esforços considerados para o trem em movimento), e às solicitações cíclicas decorrentes do tráfego ferroviário, aspectos diretamente relacionados à bitola, à segurança operacional da via e à durabilidade do sistema (AREMA, 2023).

Dessa forma, a integridade microestrutural e o desempenho mecânico das ombreiras mostram-se como fatores críticos para o funcionamento adequado da via permanente, uma vez que descontinuidades microestruturais, defeitos de fundição ou inadequações nas propriedades do material podem comprometer a capacidade de suporte e a confiabilidade do sistema de fixação. Assim, a análise detalhada desse componente justifica-se por sua importância para o desempenho global da superestrutura ferroviária e para a segurança da operação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, realizou-se inicialmente uma pesquisa junto aos documentos internos da Vale referentes aos requisitos técnicos para a aquisição de ombreiras ferroviárias aplicadas em vias permanentes. Verificou-se, entretanto, a inexistência de uma especificação técnica formal que estabelecesse critérios mínimos de aceitação para esse componente. Diante dessa ausência, a avaliação das características microestruturais, químicas e mecânicas das ombreiras analisadas foi fundamentada em normas técnicas consolidadas, documentos técnicos de órgãos reguladores nacionais e especificações adotadas por operadoras ferroviárias que disponibilizam esse tipo de referência. Tais documentos foram utilizados exclusivamente como base comparativa, com a finalidade de subsidiar a interpretação dos resultados obtidos experimentalmente.

Como referenciais normativos para o material, foram consideradas as normas EN- 1563 (2018), ASTM A536 (2023) e ABNT NBR 6916 (2018) classe FE-50007. Esta última foi indicada em documentos técnicos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para componentes de ancoragem ferroviária. Ressalta-se que essas normas não foram empregadas como critérios de conformidade direta, mas sim como parâmetros técnicos de comparação, possibilitando a avaliação da adequação do material estudado frente aos requisitos usualmente estabelecidos para ferros fundidos nodulares aplicados em sistemas de fixação ferroviária.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a sanidade e a integridade microestrutural de ombreiras ferroviárias de ferro fundido nodular utilizadas em sistemas de fixação ferroviária das ferrovias da Vale S.A. Para tanto, foram analisadas amostras de ombreiras ferroviárias novas provenientes da Estrada de Ferro Carajás (EFC) e da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). As amostras da EFC foram coletadas de forma aleatória, com base em critérios de amostragem estatística e, posteriormente, encaminhadas ao Instituto Tecnológico Vale (ITV-MI). Após o recebimento, as peças foram devidamente identificadas e submetidas a uma inspeção visual preliminar, com o objetivo de registrar as condições superficiais e identificar possíveis defeitos macroscópicos.

Na etapa subsequente, foi definido um procedimento padronizado de corte das ombreiras, visando garantir a reprodutibilidade das análises realizadas. As amostras extraídas foram preparadas por meio de técnicas metalográficas convencionais e analisadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essa etapa teve por

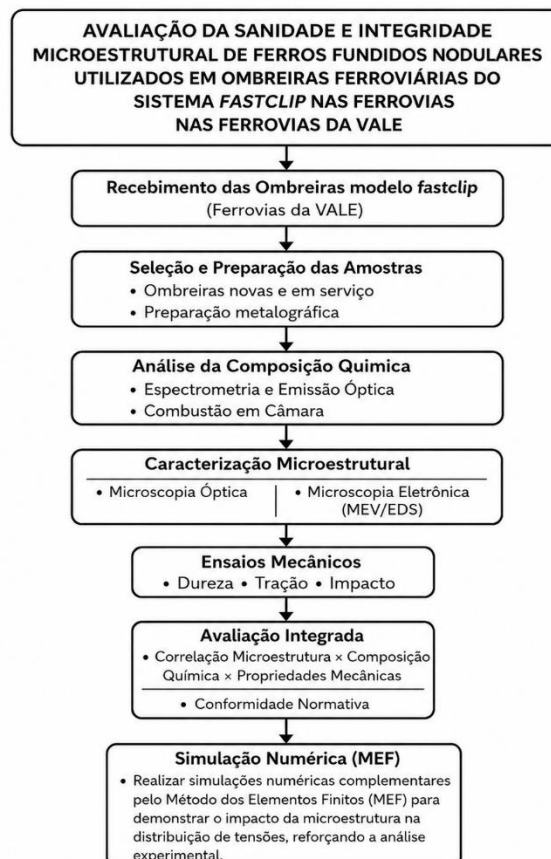
finalidade a caracterização microestrutural do material, contemplando a avaliação da morfologia, da distribuição e da sanidade dos nódulos de grafita, bem como a identificação de carbonetos, inclusões e outras descontinuidades microestruturais.

De forma complementar, foram realizados ensaios mecânicos para a determinação das propriedades do material, incluindo ensaio de dureza, ensaio de tração e ensaio de impacto Charpy. Os resultados obtidos possibilitaram correlacionar as características microestruturais com o comportamento mecânico das ombreiras ferroviárias analisadas.

A composição química das amostras também foi determinada, permitindo a comparação dos resultados com os limites estabelecidos nas normas de referência adotadas. Por fim, os resultados obtidos foram correlacionados de modo a avaliar a influência da composição química e da microestrutura no desempenho mecânico das ombreiras ferroviárias, fornecendo subsídios técnicos para a proposição de critérios de aceitação fundamentados na sanidade microestrutural.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma resumido das etapas adotadas neste estudo, oferecendo uma visão geral do procedimento metodológico empregado.

Figura 4. 1 - Fluxograma das principais etapas metodológicas do estudo.

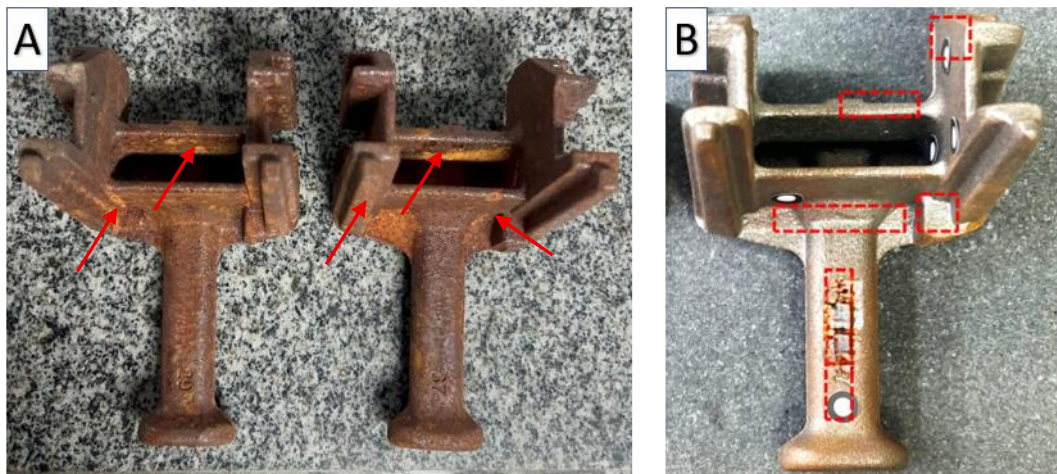


Fonte: Elaborada pela autora (2026).

#### 4.1 Preparação Metalográfica

As ombreiras novas recebidas foram inicialmente registradas fotograficamente no estado em que se encontravam no momento do recebimento. A Figura 4.2 apresenta a vista superior das ombreiras inteiras, na qual estão indicadas as regiões definidas para o seccionamento das amostras, previamente estabelecidas exclusivamente para a realização das análises microestruturais. Após esse registro, foi realizada uma inspeção visual preliminar para identificação de possíveis defeitos macroscópicos, bem como para avaliação das condições superficiais das peças no estado de recebimento.

Figura 4. 2 (a) Ombreiras recebidas proveniente da EFC para análise no ITV-MI, evidenciando a presença de camada de óxido superficial; (b) vista frontal da ombreira com indicação das regiões selecionadas para a análise microestrutural.



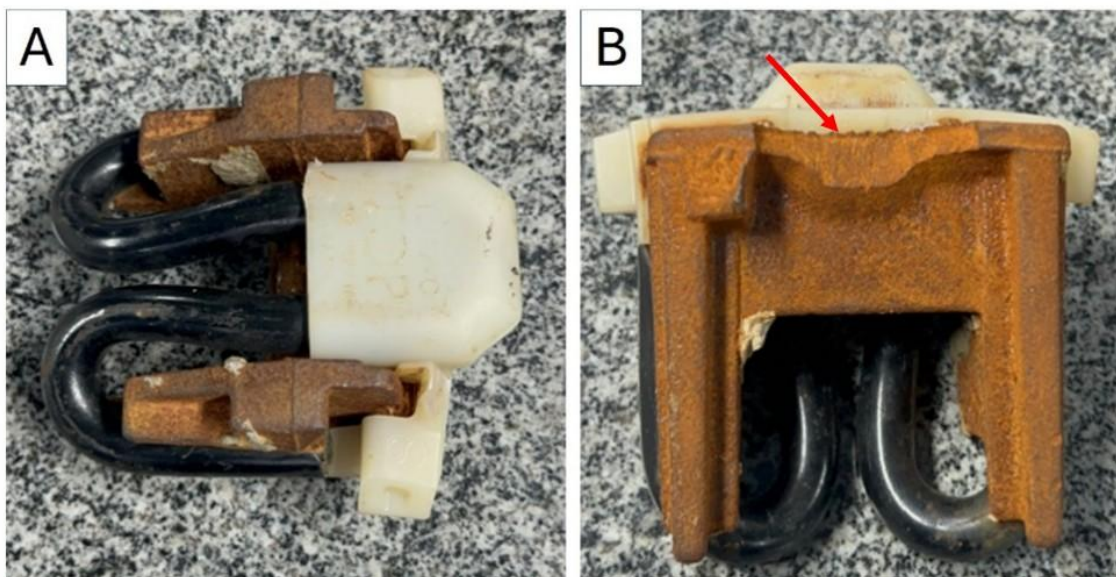
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

#### 4.2 Amostragem e Caracterização das Ombreiras Fraturadas

Paralelamente à análise das ombreiras novas, foram avaliadas quatro ombreiras fraturadas provenientes da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), encaminhadas ao laboratório de Tribologia do ITV-MI. As amostras fraturadas foram registradas conforme recebidas, ainda montadas com seus sistemas de fixação, apresentando elevado nível de oxidação tanto nas superfícies externas quanto na região de fratura.

A condição de recebimento dessas peças é apresentada na Figura 4.3, que mostra as vistas superior e inferior das ombreiras fraturadas, indicadas pela seta vermelha, evidenciando uma região de fratura com acentuado grau de oxidação. Essa etapa permitiu uma avaliação inicial do estado superficial das peças antes de qualquer intervenção laboratorial.

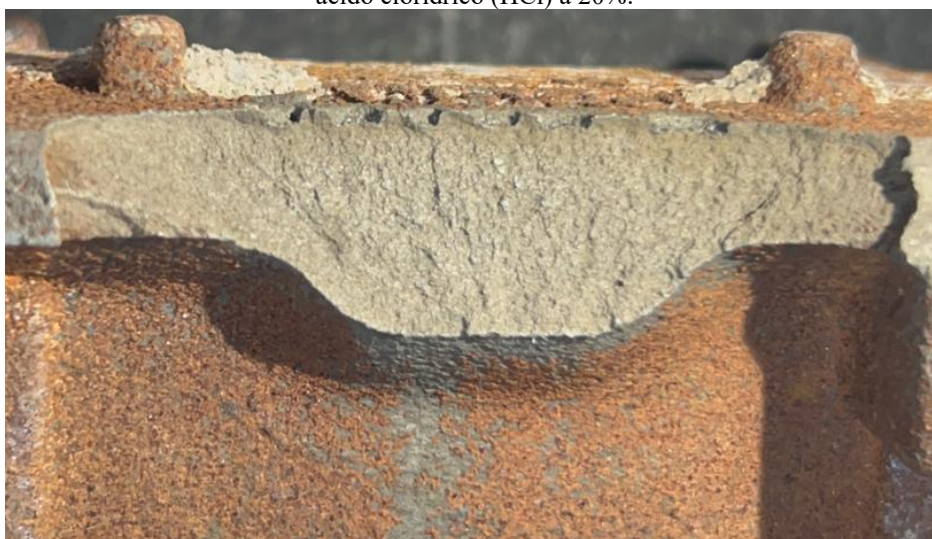
Figura 4. 3 Ombreira fraturada proveniente da EFVM para análise no ITV-MI: (a) vista superior da peça na condição de recebimento; (b) vista inferior evidenciando a região de fratura e com elevado nível de oxidação superficial.



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

No caso das ombreiras fraturadas, após a desmontagem controlada dos sistemas de fixação, foi realizada a limpeza das superfícies por meio de decapagem química em solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 20%, visando a remoção da camada de óxido. Após esse procedimento, procedeu-se a uma nova inspeção visual da superfície de fratura. A morfologia da superfície após a limpeza é apresentada na Figura 4.4, a qual evidencia, com maior clareza, as características da região fraturada.

Figura 4. 4 Superfície de fratura após o procedimento de limpeza por decapagem química em solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 20%.



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

### **4.3 Preparação Metalográfica**

Após o registro inicial e a inspeção visual preliminar, foram definidas as seções de corte das amostras, tanto das ombreiras novas quanto das fraturadas. O material foi seccionado e embutido a quente em baquelite. O preparo metalográfico incluiu lixamento progressivo com lixas d'água até granulação #1200, seguido de polimento com pasta de diamante de 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m.

Antes da aplicação do ataque químico nas amostras para análise metalográfica, foram registradas imagens das superfícies polidas sem ataque, com o objetivo de assegurar que eventuais descontinuidades observadas fossem inerentes ao processo de fabricação e não decorrentes do procedimento metalográfico. Em seguida, foi realizado ataque químico por imersão utilizando reagente Picral, com tempo aproximado de 45 segundos.

A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com a obtenção de imagens por elétrons secundários, além de análises químicas pontuais por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

### **4.4 Composição Química**

A determinação da composição química das ombreiras foi realizada com o objetivo de verificar a conformidade do material com as faixas estabelecidas pelas normas de referência adotadas neste estudo. As análises químicas foram conduzidas por meio de espectrometria de emissão óptica por centelhamento, técnica amplamente empregada para a caracterização de ligas ferrosas, em função de sua precisão e rapidez na determinação dos principais elementos de liga.

Para a quantificação dos teores de carbono e enxofre, foi utilizada a técnica de combustão em atmosfera controlada, adequada para a determinação desses elementos em materiais metálicos. As amostras foram previamente preparadas conforme o procedimento recomendado para essa técnica (Norma ASTM E1019, 2024), garantindo a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. As análises foram realizadas em amostras representativas, selecionadas a partir das ombreiras novas e fraturadas, conforme definido na etapa de amostragem. O equipamento usado foi o Arms Find.

## **4.5 Ensaios Mecânicos**

Os ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico do material das ombreiras ferroviárias, fornecendo subsídios para a análise comparativa com os requisitos normativos de referência. Os procedimentos adotados seguiram normas técnicas consolidadas, conforme descrito nas subseções a seguir.

### **4.5.1 Ensaios de Dureza Vickers**

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E92 (2023), referente aos métodos de ensaio para dureza Vickers e dureza Knoop em materiais metálicos. As medições foram executadas em 4 (quatro) amostras identificadas como OMB-01, OMB-02, OMB-03 E OMB-04, com aplicação de carga de 10kgf (HV10), mantida por 15 segundos. As indentações foram efetuadas em regiões previamente definidas das amostras, evitando-se áreas com defeitos superficiais ou descontinuidades, a fim de garantir a representatividade e a confiabilidade dos valores obtidos.

### **4.5.2 Ensaios de Tração**

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E8/E8M (2025), utilizando 9 (nove) corpos de prova usinados a partir das ombreiras selecionadas, identificados como OMB-01, OMB-02, OMB-03, OMB-04, OMB-05, OMB-06, OMB-07, OMB-08 e OMB-09. Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente, possibilitando a determinação das principais propriedades mecânicas do material, incluindo o limite de resistência à tração, o limite de escoamento e o alongamento percentual. A preparação dos corpos de prova, bem como as condições e os parâmetros de ensaio, seguiram rigorosamente as recomendações prescritas pela norma.

### **4.5.3 Ensaios de Impacto Charpy**

Os ensaios de impacto Charpy com entalhe em V foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E23 (2025), à temperatura de 23°C. O ensaio foi conduzido com a utilização de um pêndulo com energia nominal de 300J, permitindo a avaliação do comportamento do material sob carregamento dinâmico. Os corpos de prova, identificados como OMB-01, OMB-02, OMB-03, OMB-04, OMB-05, OMB-06, OMB-07, OMB-08 e OMB-09, foram confeccionados conforme as dimensões e os requisitos prescritos pela norma, de modo a garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

## 4.6 Modelagem Computacional

Como etapa complementar à análise experimental, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de avaliar a influência da microestrutura real no comportamento mecânico do ferro fundido nodular. Para isso, microestruturas representativas do material foram obtidas por microscopia óptica e utilizadas como base para a construção de modelos computacionais bidimensionais.

A partir das imagens metalográficas, foram selecionadas regiões características da peça, contemplando microestruturas com baixa e alta concentração de defeitos, de modo a representar diferentes condições de sanidade microestrutural. Essas microestruturas reais foram digitalizadas e redesenhadas em ambiente computacional, preservando, de forma representativa, a geometria, a distribuição e a morfologia das fases constituintes do material.

Os modelos geométricos obtidos foram utilizados para a geração de malhas numéricas e posterior análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), empregando-se o *software* Abaqus, versão 2017. As diferentes fases microestruturais foram consideradas individualmente nos modelos, com a atribuição de propriedades mecânicas específicas para cada fase, conforme apresentado na Tabela 4.1, permitindo representar adequadamente o comportamento da matriz metálica e da grafita nodular. A discretização numérica foi realizada a partir de uma malha de elementos finitos definida de modo a garantir representatividade geométrica das fases e estabilidade na solução. Os parâmetros de malha adotados nas simulações, incluindo critérios de refinamento e características dos elementos empregados, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 1 Propriedades das fases de ferro fundido nodular.

	Módulo Elástico [Gpa]	Tensão de escoamento [Mpa]	Coefficiente de Poison
Grafita	25	70	0,20
Ferrita	190	190	0,30
Perlita	220	550	0,30
Inclusão não metálica	73	-	0,17

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Tabela 4. 2 Parâmetros das malhas de elementos finitos empregadas nas simulações computacionais.

Micrografias	Total de Elementos na Malha	Tipo de Elemento	Altura da Imagem ( $\mu\text{m}$ )	Largura da Imagem ( $\mu\text{m}$ )
Micro 1	112314	CPE4/CPE3	478,87	640,33
Micro 2	127838	CPE4/CPE3	457,87	639,91
Micro 3	114086	CPE4/CPE3	478,79	640,22

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

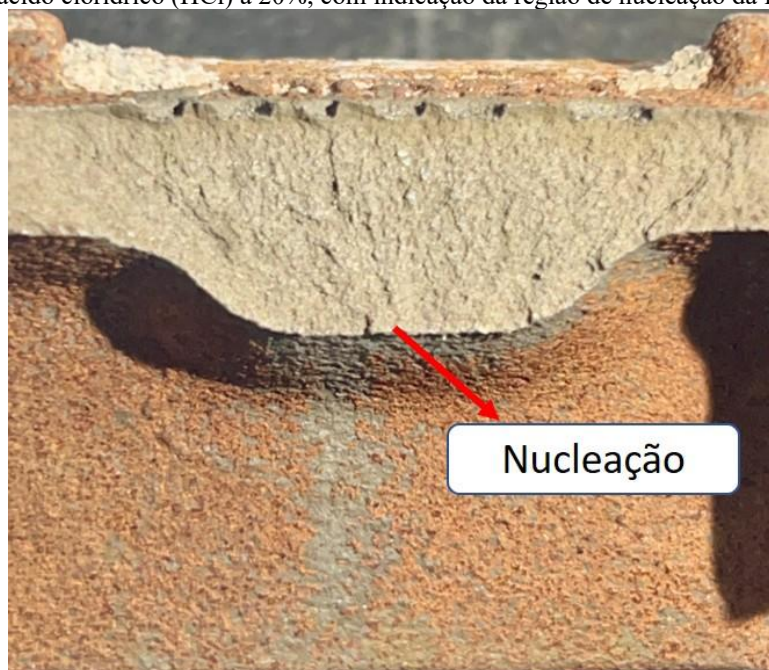
Essa abordagem possibilitou a avaliação da distribuição de tensões e deformações no interior das microestruturas analisadas, bem como a identificação de regiões de concentração de tensões associadas à presença de heterogeneidades microestruturais. Dessa forma, a modelagem computacional contribuiu para uma compreensão mais aprofundada do impacto da sanidade microestrutural no comportamento mecânico do ferro fundido nodular, complementando os resultados obtidos experimentalmente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise da Superfície de Fratura

A inspeção visual da superfície fraturada evidenciou a presença de marcas do tipo “rio”, indicadas na Figura 5.1, morfologia classicamente associada a mecanismos de fratura frágil. Essas marcas permitiram identificar a região de nucleação da falha e sugeriram que a propagação da trinca ocorreu de forma rápida, com reduzida capacidade de deformação plástica do material antes da ruptura. Tal característica constitui um importante indicativo de que a falha esteve associada à baixa tenacidade local e à presença de descontinuidades capazes de concentrar tensões (Machado, 2025).

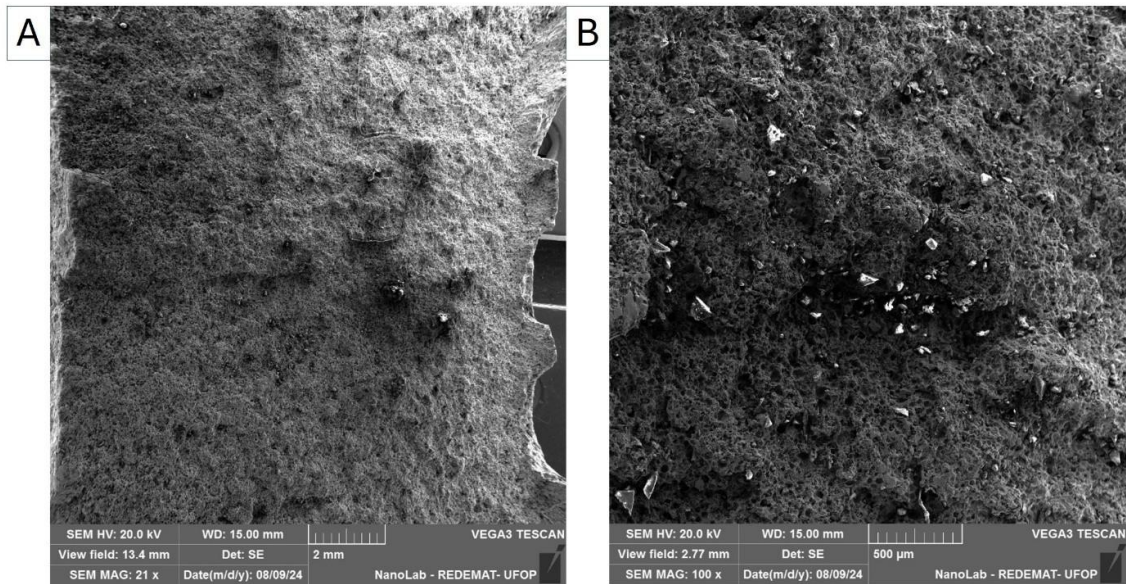
Figura 5. 1 - Superfície de fratura após o procedimento de limpeza por decapagem química em solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 20%, com indicação da região de nucleação da falha.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Em continuidade à análise, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitou uma avaliação mais detalhada da região fraturada, revelando a presença de inclusões não metálicas, caracterizadas por óxidos, concentradas na zona de fratura, conforme apresentado nas Figuras 5.2 e 5.3. A localização preferencial dessas inclusões ao longo da superfície rompida sugere sua atuação como potenciais sítios de iniciação da trinca, uma vez que tais heterogeneidades microestruturais favorecem a intensificação local de tensões e reduzem a resistência do material à propagação de falhas.

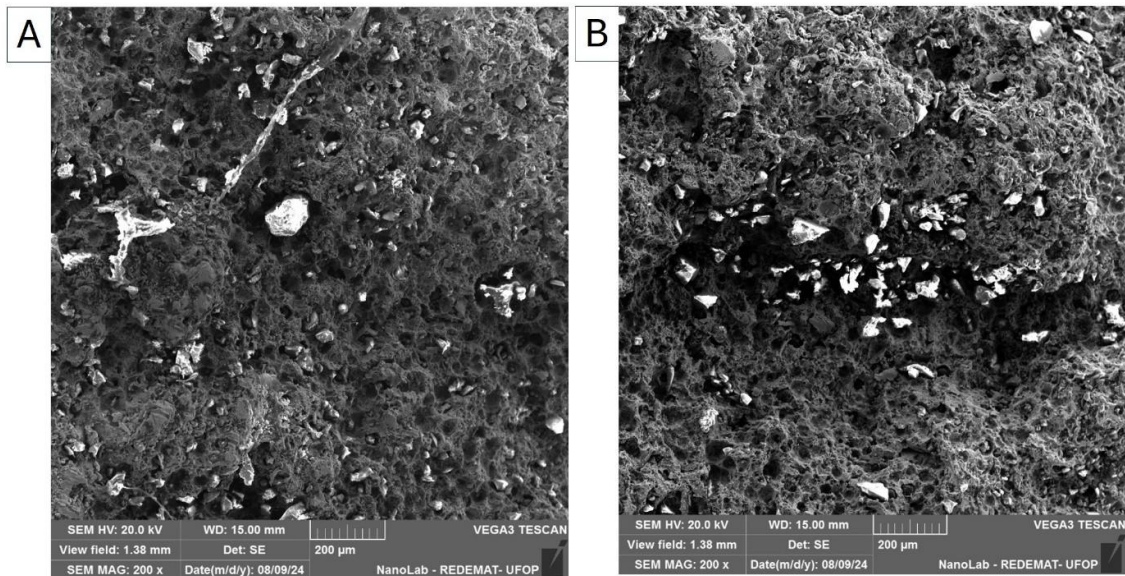
Figura 5. 2 - Imagens da superfície de fratura obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). (a) Visão geral da região de fratura, evidenciando a morfologia global da superfície. (b) Detalhe da mesma região em maior ampliação, destacando a presença e a concentração localizada de inclusões não metálicas na superfície fraturada.



Fonte:

Elaboradao pela autora (2026).

Figura 5. 3 - Imagens da superfície de fratura obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliação de 200×. (A) e (B) Regiões distintas da superfície fraturada, evidenciando a morfologia local da fratura e a elevada concentração de inclusões não metálicas distribuídas de forma heterogênea.



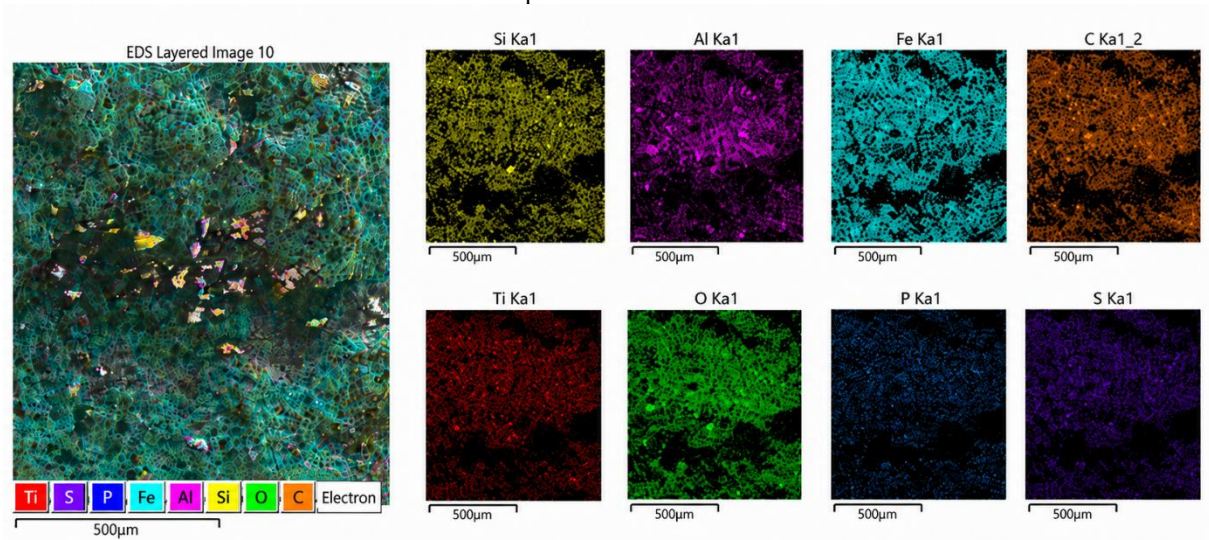
Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A caracterização química dessas regiões, realizada por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), indicou que parte significativa das inclusões era composta por óxido de alumínio

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), contaminante frequentemente associado a processos de fundição. A presença desse tipo de inclusão é particularmente crítica, pois, em razão de sua elevada dureza e natureza frágil, atua como concentrador de tensões e compromete a capacidade do material de absorver energia antes da fratura. Tal comportamento reforça a hipótese de que a nucleação da trinca esteve diretamente relacionada à presença de descontinuidades de origem metalúrgica.

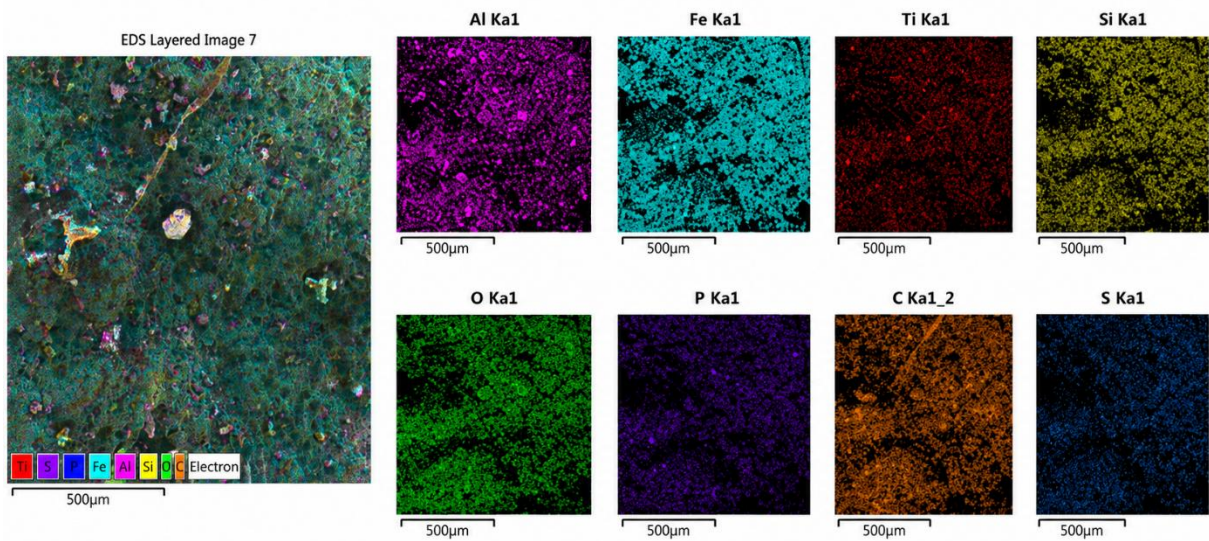
De forma complementar, a análise por EDS nas regiões de fratura, correspondentes às Figuras 5.4 e 5.5, revelou predominância de inclusões não metálicas ricas em oxigênio, silício, alumínio, cálcio e titânio, distribuídas de maneira localizada ao longo da superfície fraturada. Também foram identificados traços pontuais de enxofre associados ao ferro, sugerindo a ocorrência de sulfetos de ferro (FeS) em baixa concentração. A correlação entre os elementos detectados indicou a presença de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), fases alumino-silicatadas (Al–Si–O), silicatos de cálcio (Ca–Si–O) e, localmente, óxidos de titânio (TiO<sub>2</sub>). Esse conjunto evidencia a coexistência de diferentes tipos de inclusões exógenas e endógenas, cuja presença contribui para a heterogeneidade microestrutural do material e, conseqüentemente, para a redução de sua integridade mecânica.

Figura 5.4 - Mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) de outra área da região de fratura, mostrando a distribuição heterogênea de elementos como oxigênio, silício, alumínio, ferro e titânio, bem como a presença pontual de enxofre, indicando inclusões não metálicas concentradas em regiões específicas da superfície fraturada.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 5 - Mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizado na região de fratura, evidenciando a distribuição dos principais elementos químicos presentes na superfície fraturada, com destaque para oxigênio, silício, alumínio, ferro, titânio e traços de enxofre, associados a inclusões não metálicas.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Cabe ressaltar que a superfície de fratura apresentou morfologia altamente irregular, com relevos acentuados, cavidades e descontinuidades topográficas. Em regiões mais profundas ou com elevada inclinação local, observou-se redução da interação do feixe eletrônico com a superfície, o que resultou em menor emissão de elétrons secundários e, conseqüentemente, em áreas com aspecto mais homogêneo ou aparentemente “espelhado” nas imagens obtidas por MEV. Esse efeito está relacionado predominantemente à topografia da superfície fraturada, e não à ausência de fases ou elementos químicos, devendo, portanto, ser considerado na interpretação conjunta das micrografias e dos mapas químicos gerados por EDS.

Os resultados obtidos na análise fractográfica mostraram-se consistentes com as observações realizadas nas amostras metalográficas polidas e atacadas. Nessas condições, além de defeitos de porosidade, verificou-se a presença de inclusões em quantidade elevada e com significativa diversidade morfológica e composicional. Destacaram-se inclusões de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e sulfeto de ferro (FeS) que, em virtude de sua natureza frágil e de sua incompatibilidade mecânica com a matriz metálica, favoreceram a nucleação de microtrincas em sua vizinhança, especialmente durante as etapas de solidificação e resfriamento do material. A presença simultânea dessas descontinuidades tende a intensificar a concentração de tensões locais, favorecendo a degradação das propriedades mecânicas e aumentando a suscetibilidade do componente à falha prematura.

## 5.2 Defeitos Macroscópicos

Em continuidade à análise de falha apresentada anteriormente, na qual foram identificadas evidências de nucleação e propagação da trinca associadas à presença de descontinuidades microestruturais e inclusões não metálicas, procedeu-se à avaliação macroscópica das amostras recebidas, com o objetivo de verificar a existência de defeitos de fundição em escala mais ampla que também pudessem ter contribuído para o comprometimento estrutural das ombreiras. Para isso, após a realização de cortes em seções e planos específicos, conforme indicado na Figura 4.2, bem como nos planos de simetria da peça, foi conduzida a análise macroscópica do material. Nessa etapa, foram identificados defeitos macroscópicos relevantes, conforme ilustrado na Figura 5.6.

Na Figura 5.6, observaram-se rechupes com dimensões superiores a 1cm, evidenciando a presença de descontinuidades de grande magnitude no interior e nas regiões próximas à superfície das peças analisadas. A Figura 5.6 (a) apresenta um macrorrechupe localizado na região central da peça, especificamente na haste inserida no dormente de concreto, enquanto a Figura 5.6 (b) mostra um macrorrechupe situado em uma região próxima à superfície, na face externa da ombreira, adjacente à área de contato direto com o grampo de fixação. A recorrência desses defeitos em diferentes amostras indica que sua ocorrência não se tratou de um evento isolado, mas de uma condição associada ao processo de fabricação do componente.

Figura 5. 6 - Amostras preparadas para análise por microscopia óptica, evidenciando defeitos macroscópicos.



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Esse resultado mostrou-se particularmente relevante quando analisado em conjunto com os achados da análise fractográfica. Enquanto a superfície de fratura revelou indícios de fratura frágil e a atuação de inclusões como sítios preferenciais para nucleação da trinca, a análise macroscópica evidenciou que o material também apresentava descontinuidades volumétricas expressivas, capazes de intensificar ainda mais a concentração de tensões. Dessa forma, os rechupes identificados passaram a compor um quadro mais amplo de degradação da integridade do material, no qual defeitos de diferentes escalas macroscópicas e microestruturais atuaram de maneira potencialmente sinérgica no favorecimento da falha.

Os rechupes são defeitos característicos do processo de solidificação e se originam em decorrência da contração volumétrica do metal fundido durante a transição do estado líquido para o sólido. Esse fenômeno tende a ser mais pronunciado em regiões com maiores espessuras ou com condições de resfriamento não uniformes, favorecendo a formação de vazios internos ou superficiais. Em geral, sua ocorrência está associada a controle inadequado das condições de fundição, incluindo alimentação insuficiente de metal líquido durante a solidificação, distribuição térmica heterogênea e deficiências no projeto ou na eficiência do sistema de canais e massalotes (Garcia, 2007).

Do ponto de vista mecânico, a presença desses defeitos compromete significativamente a integridade estrutural do componente, uma vez que os rechupes atuam como concentradores de tensão e reduzem a seção resistente efetiva da peça. Em regiões submetidas a carregamentos cíclicos, impactos ou elevadas tensões localizadas como aquelas próximas à interface com o sistema de fixação tais descontinuidades podem favorecer a nucleação e a propagação de trincas, reduzindo a resistência mecânica, a tenacidade e a vida útil do componente. Nesse sentido, a presença de macrorrechupes em regiões críticas da ombreira reforça a interpretação de que a falha observada não decorreu exclusivamente de um mecanismo localizado, mas de uma condição mais ampla de comprometimento metalúrgico e estrutural do material.

Assim, a análise macroscópica complementou de forma significativa os resultados anteriormente obtidos por inspeção visual da fratura, MEV e EDS, ao demonstrar que, além das inclusões não metálicas e demais heterogeneidades microestruturais, as amostras também apresentavam defeitos de fundição de grande porte. A associação entre esses diferentes tipos de descontinuidades indica um cenário de elevada suscetibilidade à falha, justificando a importância da avaliação integrada entre macroestrutura, microestrutura e comportamento em fratura para a compreensão do desempenho das ombreiras analisadas.

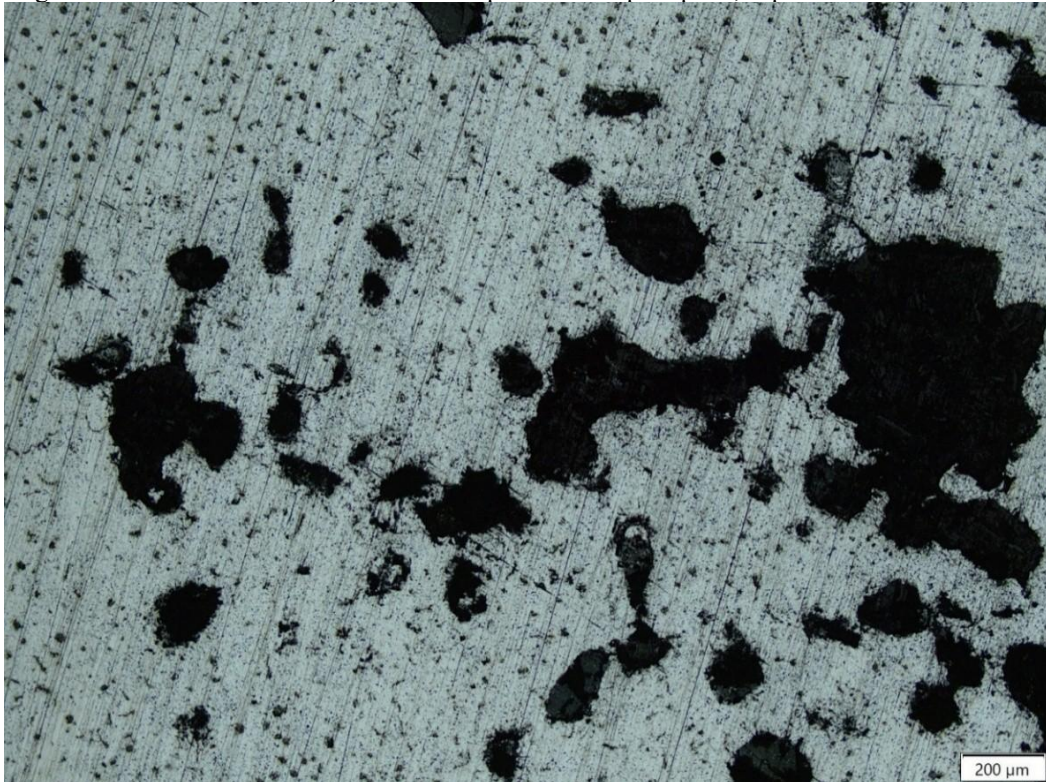
### 5.3 Caracterização Microestrutural

Em continuidade com os resultados anteriormente apresentados na análise de falha, na avaliação fractográfica e na inspeção macroscópica, a caracterização microestrutural das ombreiras revelou a presença de diferentes tipos de descontinuidades e heterogeneidades internas, evidenciando um quadro consistente de comprometimento da sanidade metalúrgica do material. Foram identificados defeitos típicos do processo de fundição, não homogeneidades microestruturais e a ocorrência de grafita em morfologias distintas da grafita nodular esperada, indicando deficiências no controle do processo produtivo e potencial influência negativa sobre o desempenho mecânico do componente em serviço.

Entre os defeitos observados, destacaram-se os microrrechupes e as inclusões não metálicas, ambos fortemente associados à redução da qualidade metalúrgica de peças fundidas. A micrografia apresentada na Figura 5.7 exemplifica a presença de microrrechupes, caracterizados por cavidades ou vazios formados em escala microestrutural em decorrência da contração volumétrica do metal durante a solidificação. Esses defeitos se desenvolvem quando o suprimento de metal líquido é insuficiente para compensar a retração do material durante o resfriamento, resultando na formação de descontinuidades internas. Embora, em termos clássicos, os microrrechupes tendam a se concentrar em regiões mais espessas da peça, nas quais o resfriamento é mais lento, nas ombreiras analisadas tais defeitos foram observados de forma disseminada ao longo da geometria do componente, com morfologias irregulares e cavidades de dimensões variadas. Esse comportamento reforça a hipótese, já sugerida pelos resultados macroscópicos, de que o processo de solidificação ocorreu de maneira inadequada e sem controle térmico homogêneo ao longo da peça.

Esse achado torna-se ainda mais relevante quando analisado em conjunto com a presença de macrorrechupes identificados anteriormente. Enquanto a avaliação macroscópica evidenciou descontinuidades volumétricas de grande porte, a análise microestrutural demonstrou que o comprometimento do material não se restringiu à escala macroscópica, mas se estendeu também à escala microscópica. Em outras palavras, os resultados indicaram que a peça apresentava um histórico de defeitos de solidificação em múltiplas escalas, o que contribuiu para a redução da seção resistente efetiva, para a intensificação local de tensões e para o favorecimento da nucleação e propagação de trincas.

Figura 5. 7 - Defeito de fundição observado por microscópio óptico, superfície lixada até 1200#.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Adicionalmente, foram identificadas inclusões não metálicas distribuídas na matriz do ferro fundido, conforme apresentado nas Figuras 5.2 e 5.3. Tais inclusões, geralmente associadas à presença de escórias, óxidos ou resíduos do processo, constituem descontinuidades microestruturais importantes, pois interrompem a continuidade da matriz metálica e atuam como concentradores de tensão. Esse resultado corrobora diretamente as observações anteriores obtidas por MEV/EDS, nas quais foram detectadas inclusões ricas em oxigênio, silício, alumínio, cálcio e titânio na superfície de fratura, sugerindo sua participação ativa no processo de falha. Assim, a análise microestrutural confirmou que as inclusões não estavam restritas à região fraturada, mas integravam o volume do material, reforçando a interpretação de que a nucleação da trinca esteve associada a uma condição intrínseca da peça, e não a um evento isolado ou exclusivamente superficial.

Tanto os microrrechupes quanto as inclusões comprometeram a homogeneidade microestrutural do material e interferiram negativamente na distribuição e na morfologia da grafita. Do ponto de vista mecânico, esses defeitos assumem papel crítico, uma vez que atuam como regiões preferenciais para concentração de tensões, favorecendo a nucleação de microtrincas sob carregamentos mecânicos. Essa condição ajuda a explicar, de forma consistente, os resultados anteriormente discutidos na análise de falha, nos quais foram

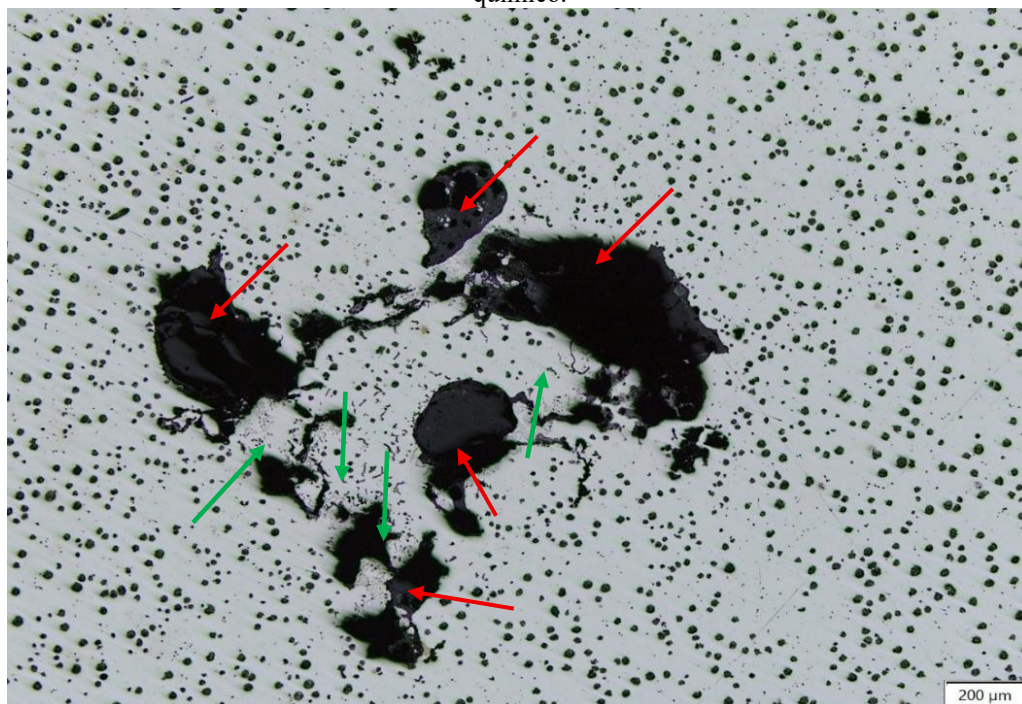
observadas características típicas de fratura frágil e propagação rápida da trinca.

Além dos defeitos de fundição anteriormente discutidos, constatou-se também a presença de grafita com morfologias distintas da grafita nodular esperada, caracterizando a ocorrência de grafita degenerada. Esse aspecto é particularmente relevante, uma vez que a morfologia da grafita exerce influência direta sobre o desempenho mecânico do ferro fundido nodular, especialmente no que se refere à resistência mecânica e à tenacidade do material (Trudel; Gagné. 1997).

Ainda conforme descrito por Trudel e Gagné (1997), a formação de grafita degenerada está associada a condições inadequadas de solidificação e a desvios na composição química, podendo resultar em redução significativa das propriedades mecânicas. Fato semelhante pode ser observado na Figura 5.8, obtida por microscopia óptica sem ataque químico, na qual observa-se defeitos de fundição (indicado por setas vermelhas) circundados por regiões com grafitas degeneradas (indicadas por setas verdes), indicando que a presença dessas discontinuidades não apenas compromete a continuidade da matriz metálica, mas também influencia localmente a morfologia da grafita formada ao seu redor. Esse comportamento reforça a interpretação de que as condições de solidificação do material foram inadequadas, favorecendo simultaneamente a formação de defeitos e a degeneração da grafita.

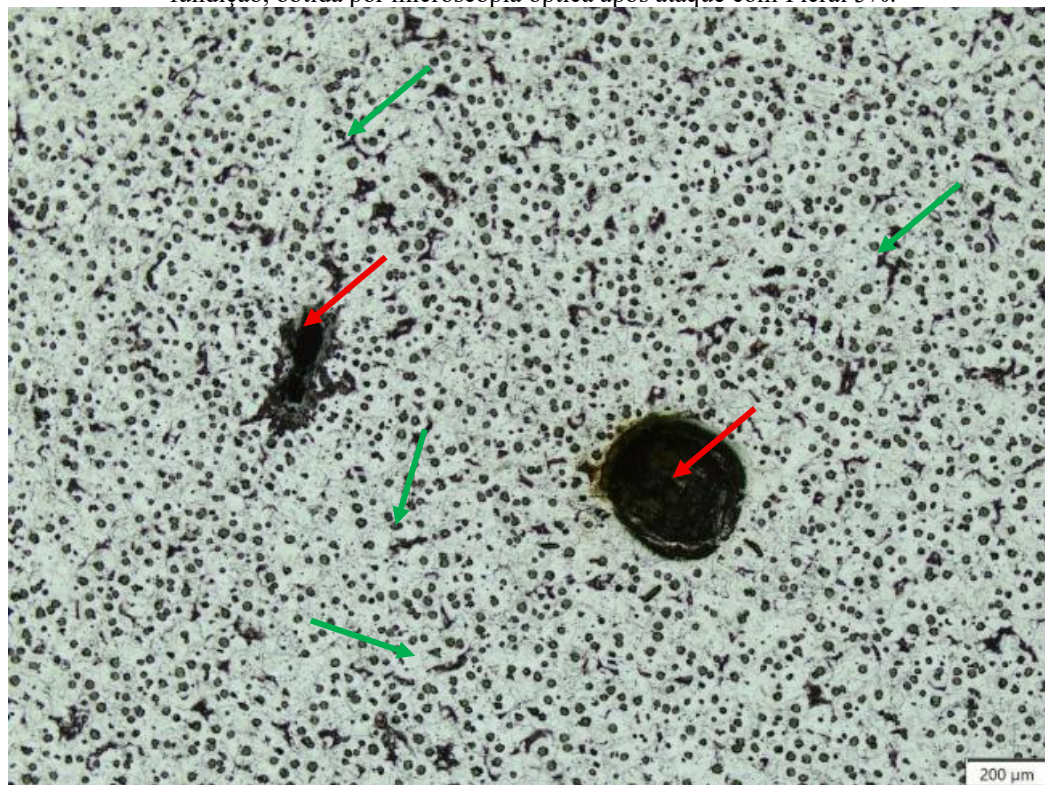
As Figuras 5.9 a 5.10 apresentam microestruturas representativas das diferentes ombreiras ferroviárias analisadas, evidenciando diferentes aspectos da heterogeneidade do material. Enquanto parte das amostras apresentou predominância de matriz ferrítica associada à presença de defeitos de fundição, outras revelaram uma microestrutura mais heterogênea, com ocorrência simultânea de defeitos de fundição (indicados por setas vermelhas) e grafita degenerada (indicada por setas verdes) em uma mesma região. Em conjunto, essas observações reforçam a variabilidade microestrutural das ombreiras e indicam condições de solidificação e controle de processo não uniformes ao longo do material.

Figura 5. 8 - Defeito de fundição observado por microscopia óptica, superfície polida até 1 $\mu$ m sem ataque químico.



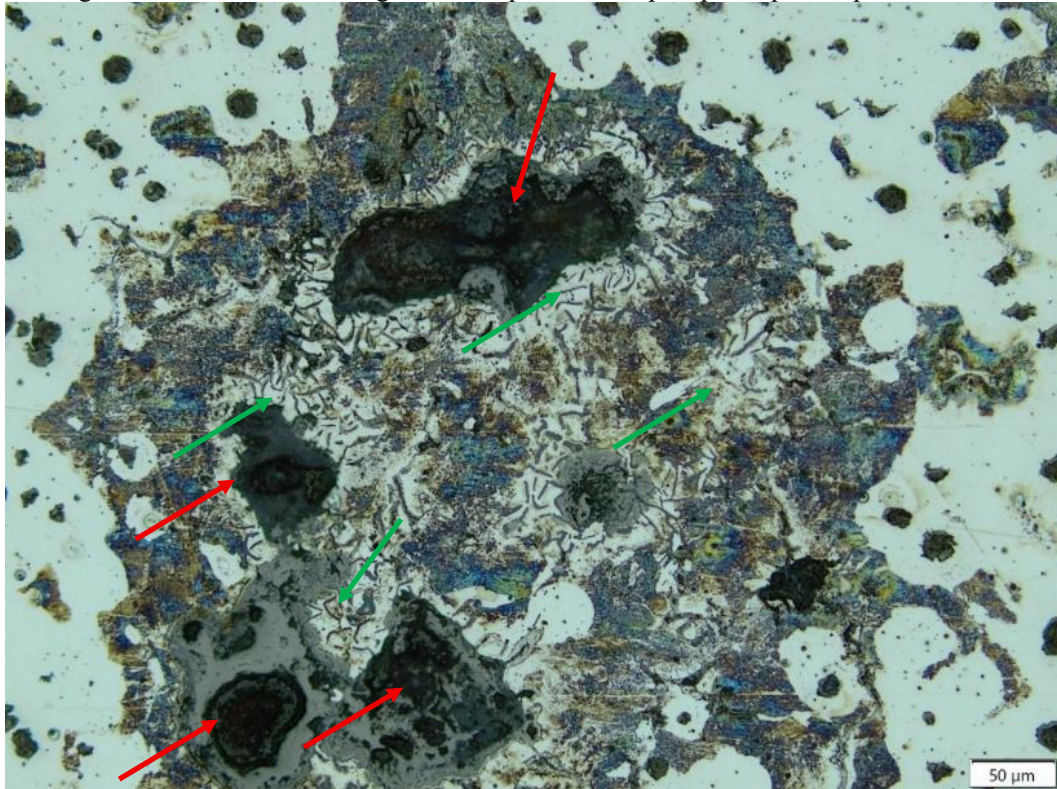
Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 9 - Microestrutura da ombreira ferroviária com predominância de ferrita e presença de defeitos de fundição, obtida por microscopia óptica após ataque com Picral 5%.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 10 - Microestrutura da ombreira ferroviária heterogênea, com presença de defeitos de fundição e grafita degenerada em uma mesma região, obtida por microscopia óptica após ataque com Picral.



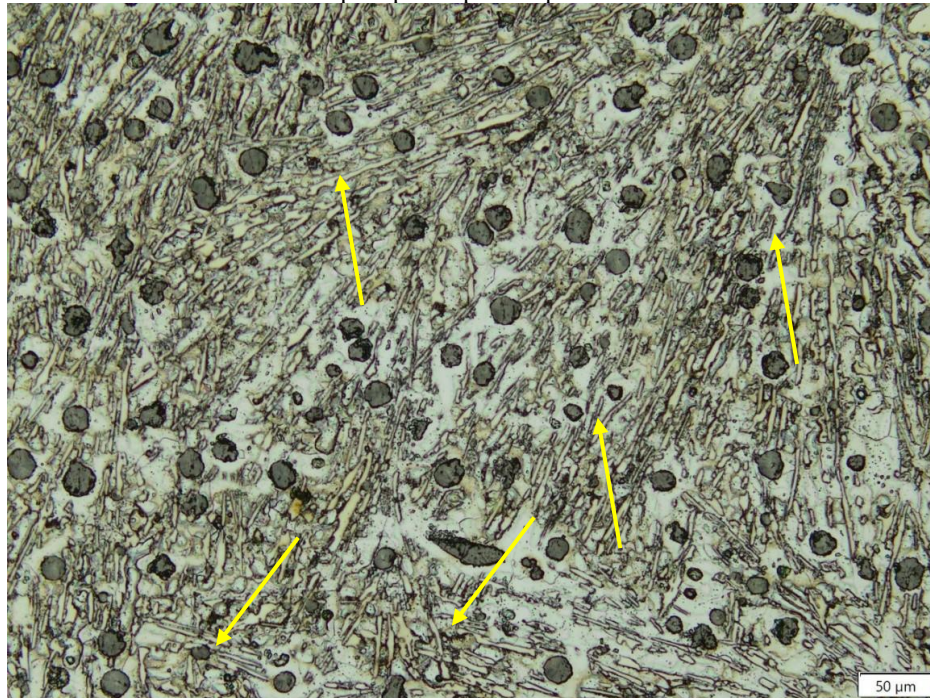
Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A Figura 5.11 apresenta a microestrutura da ombreira ferroviária com presença de carbonetos alinhados (indicados por setas amarelas), identificados por microscopia óptica após ataque com Picral. A disposição preferencial desses carbonetos indica uma distribuição microestrutural não uniforme, possivelmente relacionada a condições locais de solidificação e segregação química durante o processo de fundição. A ocorrência desse constituinte é particularmente relevante, uma vez que os carbonetos, por apresentarem elevada dureza e baixa tenacidade, podem atuar como regiões frágeis no material, favorecendo a concentração de tensões e a nucleação de trincas. Assim, a presença de carbonetos alinhados observada nessa região representa um aspecto crítico para o desempenho mecânico da ombreira, especialmente em condições de serviço sujeitas a carregamentos cíclicos e elevadas solicitações mecânicas (Gusser, 2019).

A Figura 5.12 apresenta a microestrutura da ombreira ferroviária caracterizada pela presença de grafita nodular inserida em uma matriz ferrítica-perlítica, com morfologia típica denominada “olho de boi”, observada por microscopia óptica após ataque com Picral. Essa configuração microestrutural é característica de ferros fundidos nodulares e indica, nessa região, uma condição mais compatível com a microestrutura esperada para esse material. A

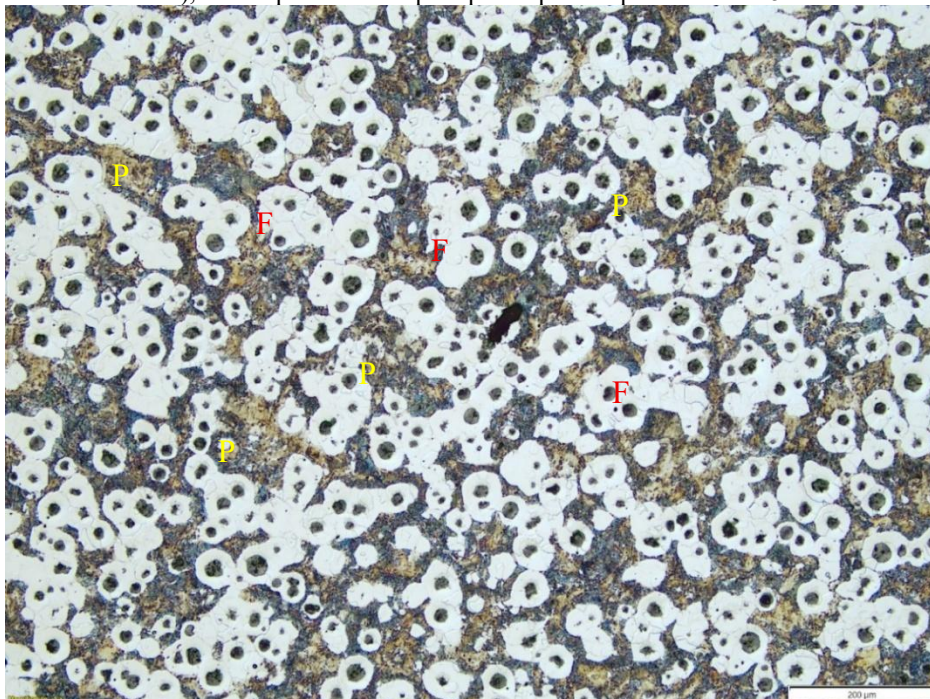
presença da ferrita (F) ao redor dos nódulos de grafita, associada à perlita (P) na matriz adjacente, sugere um equilíbrio entre ductilidade e resistência mecânica (Chiaverini, 2005).

Figura 5. 11 - Microestrutura da ombreira ferroviária com presença de carbonetos alinhados, identificados por microscopia óptica após ataque com Picral.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 12 - Microestrutura da ombreira ferroviária com grafita nodular em matriz ferrítica-perlítica (“olho de boi”), obtida por microscopia óptica após ataque com Nital 5%.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Dessa forma, a análise microestrutural permitiu aprofundar os resultados obtidos nas etapas anteriores, evidenciando que a integridade das ombreiras está relacionada à presença de diferentes descontinuidades originadas no processo de fabricação. A ocorrência de macrorrechupes, microrrechupes, carbonetos, inclusões não metálicas e grafita degenerada revelou um material com elevada heterogeneidade metalúrgica, condição potencialmente desfavorável ao desempenho estrutural do componente em serviço.

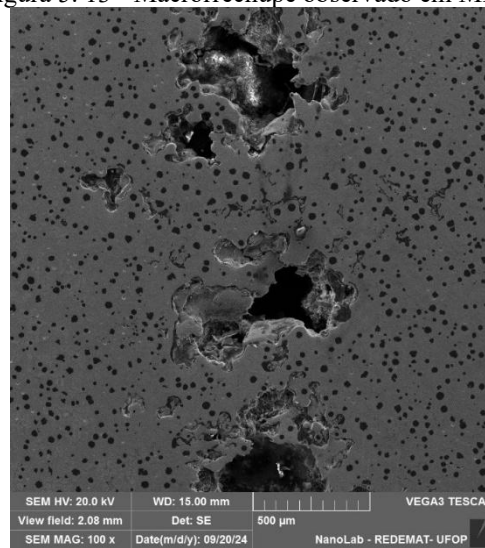
Adicionalmente, a avaliação conjunta das diferentes regiões analisadas demonstrou que a ombreira não apresentou uniformidade microestrutural ao longo de toda a sua extensão, mas sim a coexistência de áreas com microestrutura mais compatível com a esperada para o ferro fundido nodular e regiões marcadas por defeitos de fundição e irregularidades microestruturais. Esse contraste reforça a complexidade interna do material e indica que o comportamento das ombreiras deve ser compreendido a partir da distribuição e da interação entre essas diferentes condições microestruturais. Nesse sentido, os resultados obtidos nesta etapa constituíram uma base importante para o aprofundamento da investigação, especialmente por meio da caracterização mais detalhada das inclusões por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e da análise complementar de sua influência sobre o comportamento do componente.

#### **5.4 Análise Microestrutural via MEV/EDS**

Após a caracterização microestrutural inicial por microscopia óptica, as amostras foram analisadas em maior nível de detalhe por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de obter imagens com maior ampliação e resolução, possibilitando uma avaliação mais aprofundada dos defeitos presentes no material.

A Figura 5.13 apresenta uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), evidenciando o mesmo defeito anteriormente identificado por microscopia óptica, apresentado na Figura 5.7. Além da descontinuidade principal, observou-se a presença de porosidades distribuídas na microestrutura, com dimensões variadas, indicando que o defeito não se restringiu a uma cavidade isolada, mas esteve associado a um conjunto de descontinuidades presentes na região analisada. Foram identificadas cavidades com dimensões superiores a 500 $\mu\text{m}$ , bem como porosidades menores, da ordem de 200 $\mu\text{m}$ . A ocorrência desses defeitos em diferentes escalas reforça o comprometimento da sanidade do fundido e evidencia deficiências no controle do processo de solidificação, especialmente no que se refere à alimentação do metal líquido e à uniformidade do resfriamento.

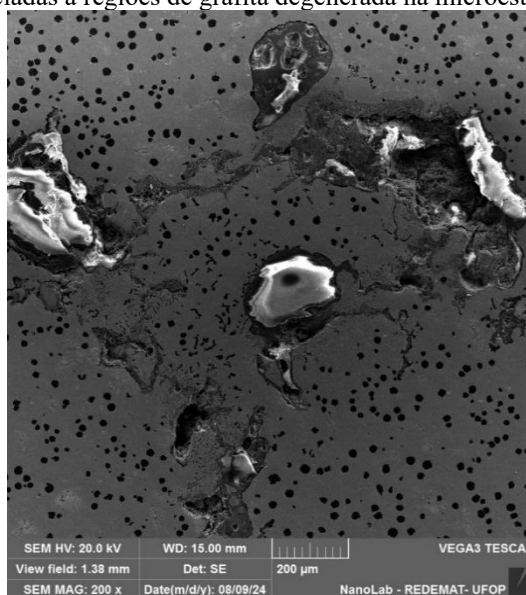
Figura 5. 13 - Macrorrechupe observado em MEV.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

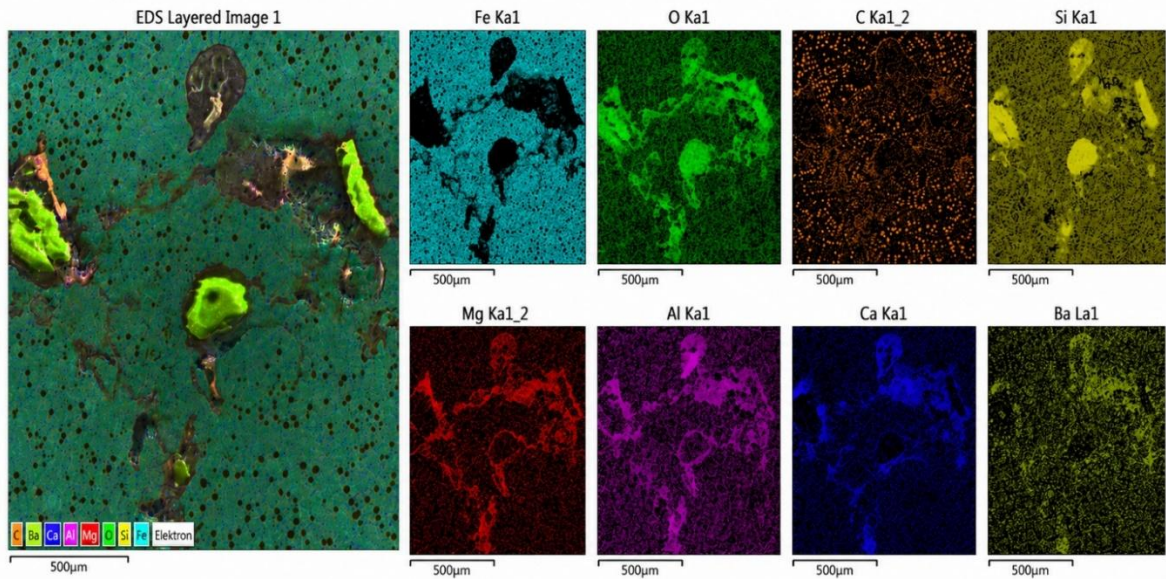
As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam, respectivamente, a morfologia e a caracterização química de inclusões não metálicas identificadas na microestrutura das ombreiras analisadas. Na Figura 5.14, observa-se a presença de múltiplas inclusões associadas a regiões de grafita degenerada, enquanto a Figura 5.15, referente ao mapeamento elementar por EDS, mostra a distribuição espacial de elementos como silício, ferro, carbono, cálcio, alumínio, magnésio, oxigênio e bário. Os mapas indicam enriquecimento localizado principalmente em oxigênio, silício, alumínio, cálcio e magnésio nas regiões das inclusões, sugerindo a presença de fases de natureza predominantemente óxida e silicática inseridas na matriz metálica.

Figura 5. 14 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando múltiplas inclusões não metálicas associadas a regiões de grafita degenerada na microestrutura.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

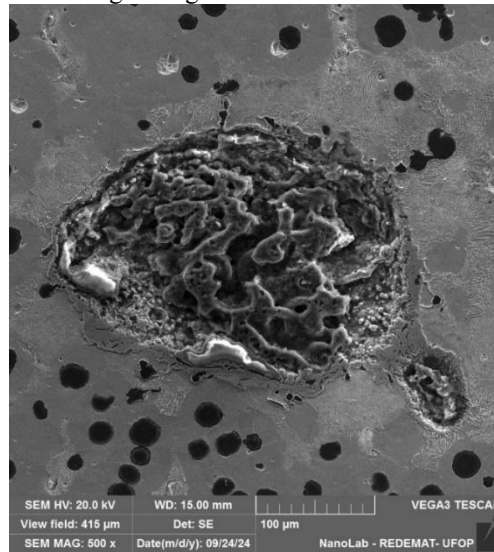
Figura 5. 15 - Mapeamento elemental por (EDS) realizado em região da microestrutura contendo inclusões não metálicas, evidenciando a distribuição espacial de Si, Fe, C, Ca, Al, Mg, O e Ba.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

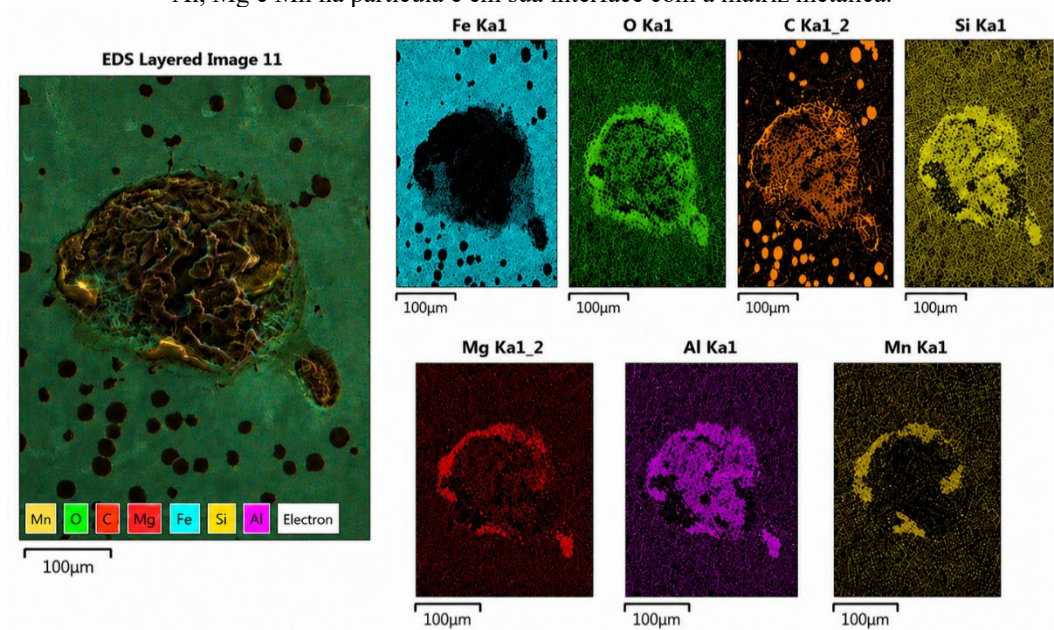
As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam, respectivamente, a morfologia e o mapeamento químico de uma inclusão não metálica de grandes dimensões identificada na microestrutura da ombreira. A imagem de MEV mostra uma inclusão com morfologia irregular e interface bem definida com a matriz metálica, observando-se ainda a presença pontual de grafita em seu entorno, sem predominância de grafita degenerada. O mapeamento por EDS revelou distribuição heterogênea de elementos, com presença de oxigênio, silício, alumínio e magnésio na inclusão, sugerindo natureza predominantemente óxida/silicática. Adicionalmente, observou-se segregação localizada de manganês e magnésio ao redor da partícula, comportamento que pode ser interpretado como compatível com uma organização composicional do tipo *core-shell*, caracterizada pela diferenciação química entre regiões centrais e periféricas da inclusão. Esse tipo de arranjo é coerente com a literatura sobre inclusões complexas em ferros fundidos nodulares, na qual são descritos mecanismos de nucleação sequencial e partículas com composição heterogênea formadas em múltiplas etapas durante o tratamento do metal líquido e a solidificação (Alonso *et al.*, 2022; Stefanescu *et al.*, 2020).

Figura 5. 16 - Imagem obtida por MEV da amostra polida e atacada, evidenciando uma inclusão não metálica de grandes dimensões, com morfologia irregular e interface bem definida com a matriz metálica.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 17 - Mapeamento elemental por EDS de inclusão não metálica, evidenciando a distribuição de O, Si, Al, Mg e Mn na partícula e em sua interface com a matriz metálica.

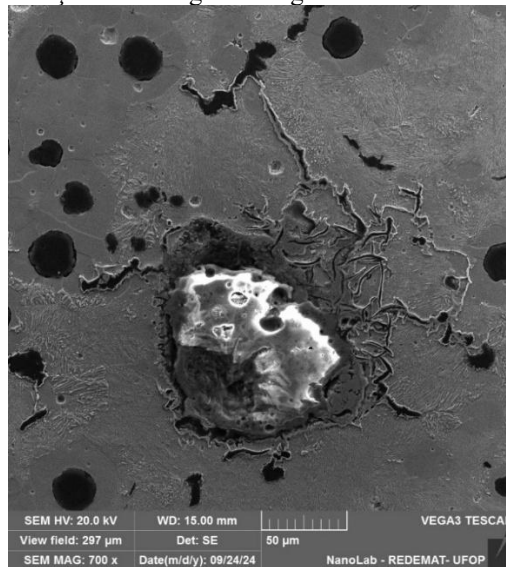


Fonte: Elaborada pela autora (2026).

As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam, respectivamente, a imagem de MEV e o mapeamento elemental por EDS de uma inclusão não metálica identificada na microestrutura da ombreira. Na Figura 5.18, observa-se que a inclusão apresenta morfologia irregular e está associada à formação local de grafita degenerada em sua vizinhança, evidenciando que essa descontinuidade atuou como elemento perturbador do processo de grafitização e alterou a morfologia da grafita na região adjacente. Complementarmente, a Figura 5.19 mostra que a

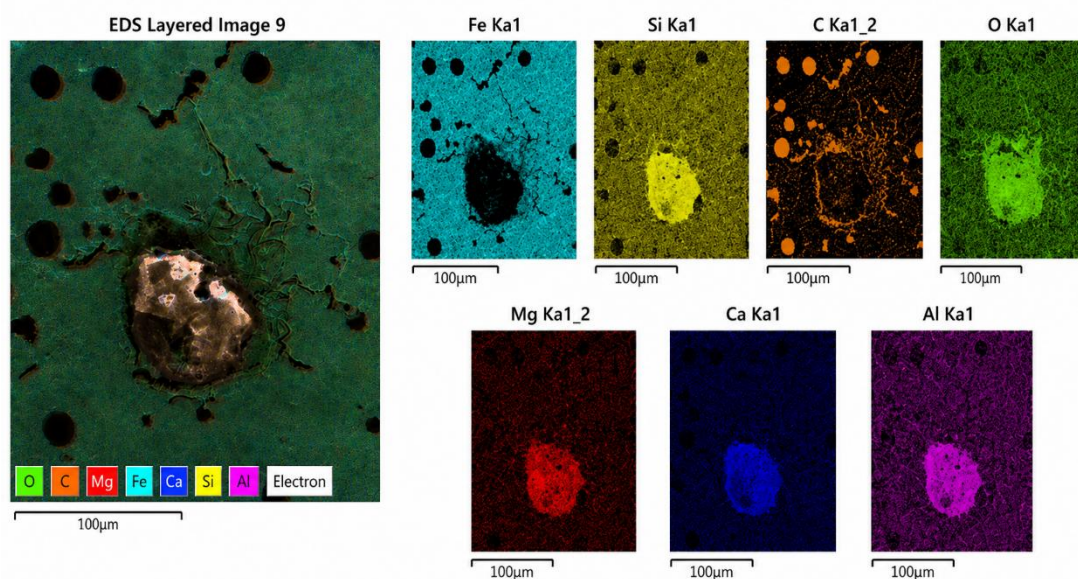
inclusão é enriquecida principalmente em oxigênio, silício, magnésio, cálcio e alumínio, indicando composição de natureza predominantemente óxida/silicática. Em conjunto, esses resultados mostram que a inclusão não apenas constitui uma heterogeneidade química na matriz, mas também interferiu diretamente na evolução microestrutural local, favorecendo a formação de grafita não esferoidal e, conseqüentemente, contribuindo para a redução da qualidade metalúrgica do material.

Figura 5. 18 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada evidenciando inclusão não metálica associada à formação local de grafita degenerada ao seu redor.



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

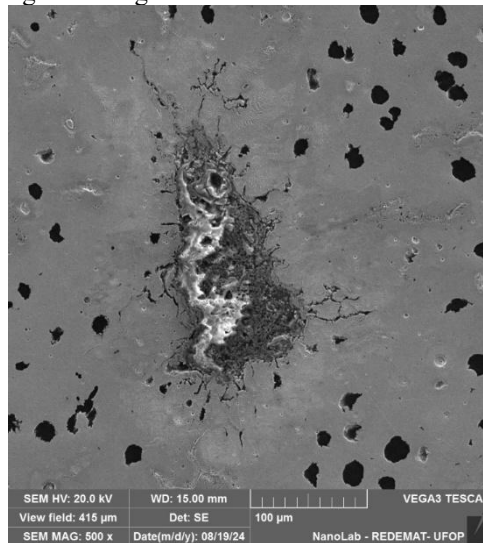
Figura 5. 19 - Mapeamento elemental por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.18, evidenciando a distribuição de O, Si, Mg, Ca e Al na partícula.



Fonte: Elaborada pela autora (2024)

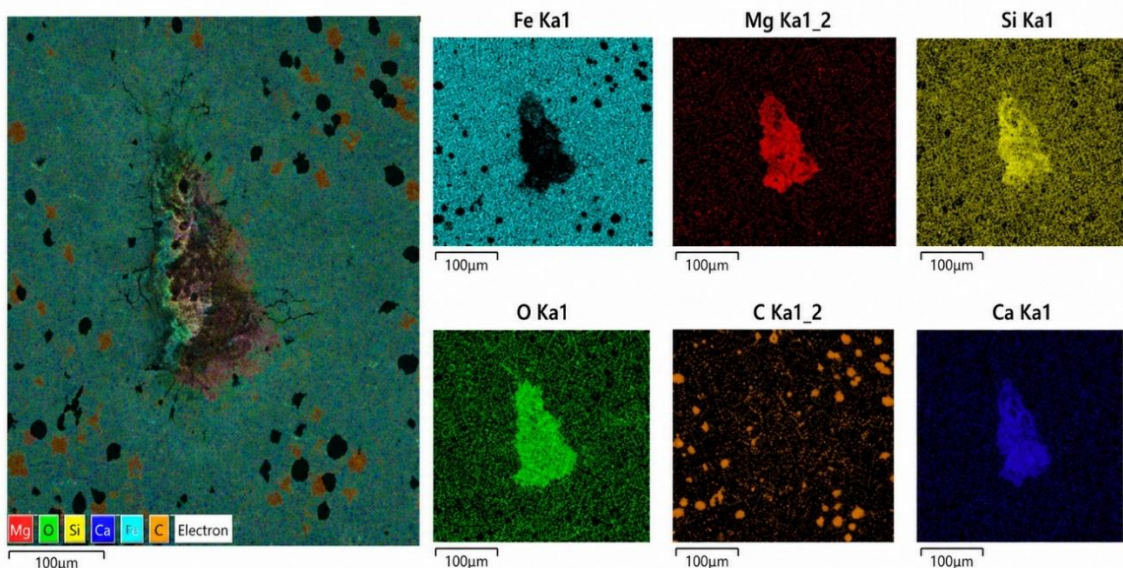
As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam, respectivamente, a imagem de MEV e o mapeamento elementar por EDS de uma inclusão não metálica identificada na microestrutura da ombreira. Na Figura 5.20, observa-se uma inclusão de morfologia alongada e irregular, com interface bem definida com a matriz metálica e indícios de perturbação microestrutural em sua vizinhança, evidenciados pelas ramificações e descontinuidades ao redor da partícula. Complementarmente, a Figura 5.21 mostra que a inclusão apresenta enriquecimento principalmente em magnésio, silício, oxigênio e cálcio, indicando composição de natureza predominantemente óxida/silicática, distinta da matriz rica em ferro.

Figura 5. 20 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando inclusão não metálica de morfologia alongada e irregular na microestrutura da ombreira.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

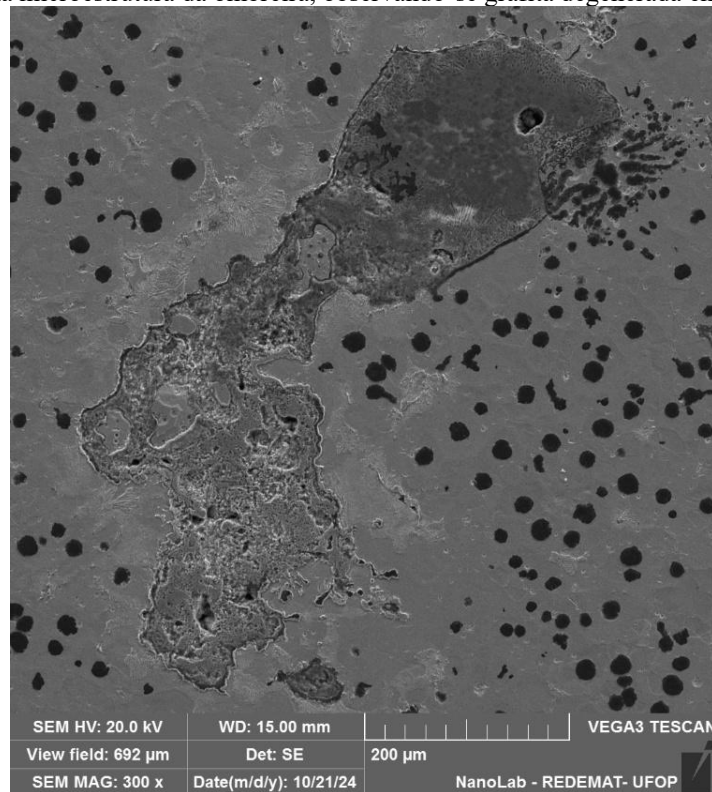
Figura 5. 21 - Mapeamento elementar por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.20, evidenciando a distribuição de Mg, Si, O e Ca na partícula.



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

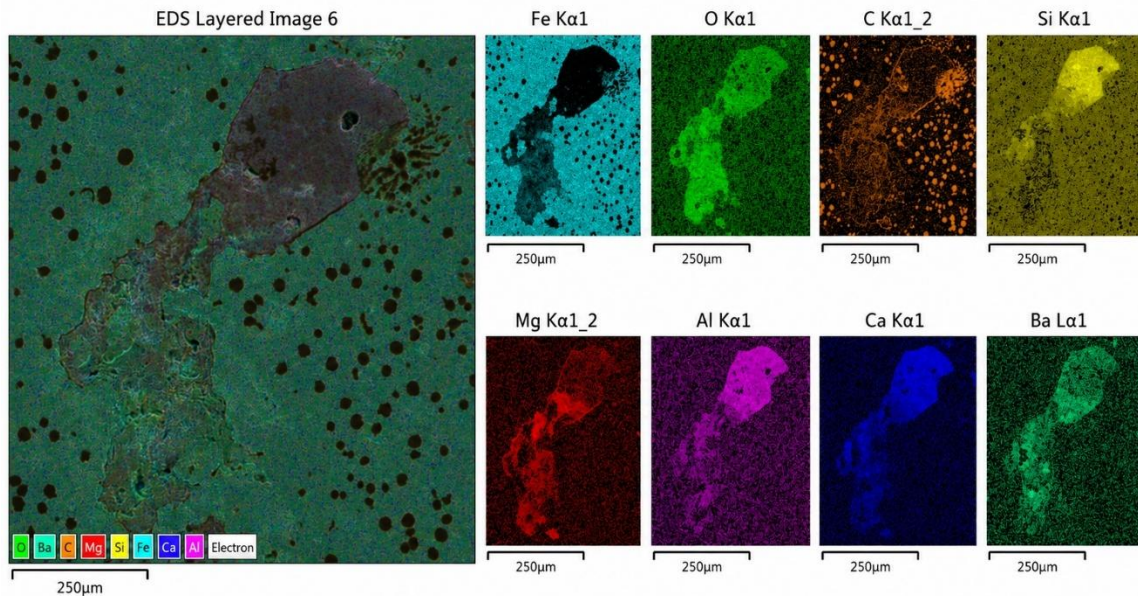
As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam, respectivamente, a imagem de MEV e o mapeamento elementar por EDS de uma inclusão não metálica de grandes dimensões identificada na microestrutura da ombreira. Na imagem de MEV, observa-se uma partícula com morfologia irregular e heterogênea, formada por regiões com contraste distinto e contorno não uniforme, além de uma porção adjacente mais alongada, sugerindo que trata-se de uma inclusão complexa ou resultante da coalescência de constituintes de naturezas diferentes. O mapeamento por EDS evidencia distribuição de elementos como O, Mg, Si, Ca, Al e outros constituintes localmente concentrados na partícula, confirmando seu caráter quimicamente heterogêneo e indicando natureza predominantemente óxida/silicática. A heterogeneidade na distribuição desses elementos ao longo da inclusão sugere que sua formação ocorreu por múltiplas etapas ou por interação entre diferentes produtos de reação no metal líquido, o que reforça seu potencial de interferência sobre a homogeneidade microestrutural e sobre o desempenho mecânico local do material.

Figura 5. 22 - Imagem de MEV da amostra polida e atacada, evidenciando inclusão não metálica complexa de grandes dimensões na microestrutura da ombreira, observando-se grafita degenerada em sua região adjacente.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 23 - Mapeamento elementar por EDS da inclusão não metálica apresentada na Figura 5.22, evidenciando a distribuição dos principais elementos químicos na partícula e em sua interface com a matriz metálica.



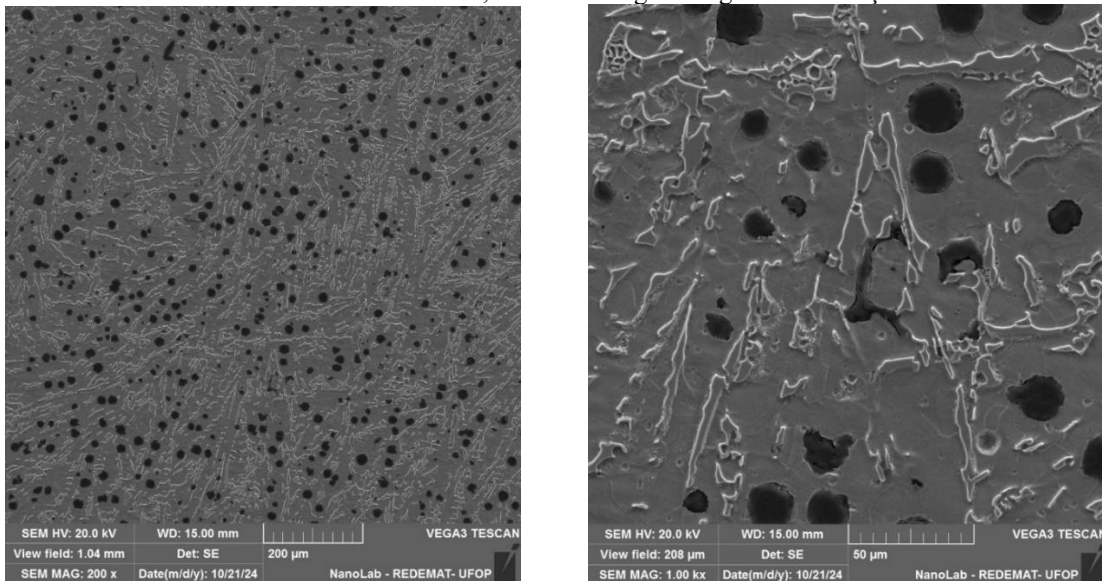
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Com base nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizou-se o mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) com o objetivo de identificar e caracterizar quimicamente as inclusões presentes na microestrutura do material. A análise dos mapas elementares revelou a ocorrência de diferentes inclusões não metálicas, distribuídas de forma heterogênea. A correlação entre esses elementos indicou a presença de óxidos e silicatos complexos. Também foram identificados traços de enxofre associados ao ferro, sugerindo a possível presença localizada de sulfetos de ferro (FeS). Esses resultados evidenciam que as inclusões presentes nas ombreiras não se restringiram a uma única natureza química, mas constituíram um conjunto diversificado de heterogeneidades de origem metalúrgica, capazes de interferir diretamente na sanidade do material.

De modo geral, as inclusões não metálicas representam um fator crítico para a integridade microestrutural, uma vez que atuam como concentradores de tensão e favorecem a nucleação de microtrincas. Em particular, inclusões como o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e o sulfeto de ferro (FeS), em razão de sua elevada dureza e de seu comportamento intrinsecamente frágil, tendem a intensificar esse efeito tanto durante a solidificação quanto sob carregamentos mecânicos em serviço. Além disso, a associação observada entre inclusões e regiões com grafita degenerada indicou que essas descontinuidades não apenas interromperam a continuidade da matriz metálica, mas também interferiram localmente na morfologia da grafita, agravando a heterogeneidade microestrutural do componente.

Adicionalmente, merece destaque a presença de carbonetos na microestrutura, condição indesejável em um material especificado para aplicações sujeitas predominantemente a esforços de tração e impacto e não para resistência ao desgaste. Do ponto de vista metalúrgico, a ocorrência de carbonetos em um ferro fundido nodular indica uma condição microestrutural incompatível com o comportamento esperado desse material, uma vez que tais constituintes promovem aumento da fragilidade e redução da ductilidade. Essa condição foi evidenciada pelas análises por MEV apresentadas na Figura 5.24, nas quais observam-se regiões ricas em carbonetos, com morfologia irregular e distribuição localizada na matriz metálica. A presença desses constituintes reforça a existência de variações locais de composição e de condições inadequadas de solidificação, contribuindo para a formação de regiões mais frágeis e suscetíveis à nucleação de trincas.

Figura 5. 24 - Imagem obtida por MEV da amostra polida e atacada, evidenciando a presença de carbonetos distribuídos na matriz metálica, com morfologia alongada e orientação variada.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Em conjunto, os resultados obtidos por MEV/EDS complementaram de maneira decisiva as observações previamente realizadas por inspeção visual, análise macroscópica e microscopia óptica. Enquanto a análise de falha e a fractografia já haviam indicado um comportamento compatível com fratura frágil e a atuação de descontinuidades como sítios preferenciais para a nucleação da trinca. A caracterização por MEV permitiu mostrar, em maior nível de detalhe, a natureza, a morfologia e a distribuição dessas heterogeneidades. A identificação simultânea de macrorrechupes, microrrechupes, inclusões não metálicas

complexas, grafita degenerada e carbonetos evidenciou que a ombreira apresentou um quadro de acentuada heterogeneidade metalúrgica, resultante de deficiências no processo de fabricação. Dessa forma, os resultados indicam que o comprometimento do desempenho mecânico do componente não esteve associado a um único defeito isolado, mas à atuação conjunta de diferentes descontinuidades que, ao interagirem, intensificaram as concentrações de tensão locais e aumentaram a suscetibilidade do material à falha prematura em serviço.

## 5.5 Composição Química

A composição química exerce influência direta sobre a evolução microestrutural do ferro fundido nodular e, conseqüentemente, sobre o comportamento mecânico do componente. Quando analisados em conjunto com os resultados previamente obtidos por microscopia óptica, MEV/EDS e análise de falha, os dados de composição química fornecem suporte adicional para a interpretação de que as ombreiras avaliadas apresentaram deficiências no controle metalúrgico e no processo de fabricação. A Tabela 5.1 apresenta a composição química das amostras estudadas, evidenciando, de modo geral, baixos teores de magnésio (Mg), inferiores aos limites estabelecidos pelas normas ASTM A536 (2023), EN 1563 (2018), e ABNT NBR 6916 (2018).

Esse resultado é particularmente relevante, uma vez que o magnésio desempenha papel fundamental no processo de nodulização da grafita. Em teores adequados, esse elemento favorece a formação de grafita esferoidal; entretanto, quando presente em concentrações inferiores às recomendadas, sua eficiência de nodulização é comprometida, dificultando a obtenção da morfologia nodular desejada e favorecendo o surgimento de grafita degenerada, vermicular ou outras morfologias irregulares. Nesse sentido, os baixos teores de magnésio identificados, em sua maioria inferiores a 0,03%, quando as normas recomendam valores na faixa de 0,04% a 0,07%, mostram-se coerentes com os resultados microestruturais anteriormente discutidos, nos quais foram observadas regiões com grafita degenerada e significativa heterogeneidade microestrutural.

Adicionalmente, foi identificada a presença de elementos potencialmente deletérios, como Pb, Sn, Bi, As, Te e Sb, os quais, mesmo em pequenas quantidades, podem interferir negativamente no processo de grafitação e na estabilidade da nodulização. A presença desses elementos é especialmente crítica em ferros fundidos nodulares, pois pode contribuir para a formação de grafita com morfologias indesejáveis, intensificar a ocorrência de heterogeneidades microestruturais e, conseqüentemente, comprometer o desempenho mecânico

do material. Dessa forma, os resultados apresentados na Tabela 5.1 corroboram as evidências microestruturais e fractográficas anteriormente apresentadas, indicando que as ombreiras analisadas apresentaram não apenas defeitos de fundição e descontinuidades internas, mas também uma condição química desfavorável à obtenção de uma microestrutura plenamente adequada para aplicações submetidas a elevadas solicitações mecânicas e cíclicas.

Tabela 5. 1 - Composição química das ombreiras (% em peso). Os elementos marcados com asterisco correspondem aos elementos deletérios.

Elemento	Omb. 1 Nova	Omb. 2 Nova	Omb. 3 Nova	Omb. 4 Nova	Omb. 5 Nova	Omb. 6 Nova	Omb. 7 Nova	Omb. 8 fraturada	Omb. 9 fraturada	ASTM A536/ 80/55-06	Conforme literatura	EN 1563 / EN-GJS-500-7
C	3,550	3,400	3,210	3,350	3,210	3,260	3,460	3,550	3,470	3,60-3,80	-	3,25-3,70
Si	2,290	2,410	2,540	2,610	2,580	2,540	2,510	2,500	2,420	1,80-2,80	-	2,40-3,00
Mn	0,100	0,110	0,120	0,110	0,120	0,120	0,110	0,160	0,150	0,15-1,00	-	0,10-0,30
P	0,052	0,050	0,055	0,055	0,054	0,057	0,059	0,061	0,062	máx 0,030	-	0,015-0,080
S	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,010	0,007	máx 0,002	-	0,005-0,020
Mg	0,020	0,030	0,030	0,040	0,020	0,010	0,030	0,016	0,015	0,03-0,06	-	0,040-0,070
Cr	0,027	0,028	0,029	0,029	0,030	0,029	0,028	0,030	0,030	0,030-0,070	-	-
Cu	0,160	0,160	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,110	0,100	0,15-1,00	-	-
Ce	0,030	ND	ND	ND	0,040	ND	ND	ND	ND	0,005-0,020	-	-
Ni	0,028	0,033	0,009	0,007	0,009	0,009	0,009	0,030	0,030	0,05-0,20	-	-
V	0,009	0,009	0,037	0,029	0,037	0,025	0,030	0,007	0,006	-	máx 0,100	-
Ti	0,004	0,004	0,003	0,004	0,002	0,004	0,003	0,003	ND	-	máx 0,04	-
Al	0,009	0,008	0,009	0,009	0,011	0,009	0,008	0,013	0,007	-	máx 0,01	-
Pb*	0,01	0,03	ND	0,100	0,110	0,050	ND	0,100	0,220	-	máx 0,009	-
Sn*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,14	0,16	-	máx 0,003	-
Bi*	0,030	ND	0,030	ND	ND	0,030	0,080	ND	0,050	-	máx 0,003	-
Te*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,050	0,120	-	máx 0,005	-
As*	0,070	ND	0,060	ND	ND	0,030	ND	0,110	ND	-	máx 0,005	-
Sb*	ND	ND	ND	0,060	ND	ND	ND	0,090	ND	-	-	-
Mo	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,001	-	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Os elementos assinalados com asterisco na Tabela 5.1 são classificados como deletérios, pois podem comprometer de forma significativa as propriedades mecânicas do material, atuando como potenciais agentes de fragilização microestrutural. Conforme amplamente discutido na literatura, a presença desses elementos deve ser rigorosamente minimizada para assegurar a integridade estrutural e o desempenho mecânico adequado do material (Guesser, 2019; Santos; Branco, 1989). Para os elementos deletérios Pb, Bi, As e Sb, avaliados neste estudo, verificou-se que os valores medidos se situaram acima dos limites recomendados pela literatura especializada, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Outro aspecto relevante refere-se ao teor de alumínio. Embora não se trate de um elemento diretamente limitado por especificações composicionais aplicáveis ao material em estudo, seu controle é fundamental, pois a formação de inclusões ricas em alumínio e oxigênio está associada à fragilização microestrutural. Em relação ao vanádio (V), embora esse elemento também mereça atenção por seu potencial de influenciar a morfologia da grafita, os teores

medidos não indicaram, neste caso, um papel predominante na degradação microestrutural observada.

Embora as normas de referência utilizadas para o ferro fundido nodular não estabeleçam uma composição química fixa para a classe do material, a comparação entre os resultados obtidos e as faixas composicionais usualmente associadas a melhores propriedades mecânicas permite interpretações importantes. Nesse contexto, observa-se que composições mais controladas, frequentemente associadas a materiais com desempenho compatível ao exigido pela norma ASTM A536 (2023), tendem a favorecer maior estabilidade microestrutural e melhores respostas mecânicas. Assim, mais do que o enquadramento formal em uma composição normativa, o que se evidencia é a necessidade de um controle metalúrgico rigoroso, capaz de assegurar níveis adequados de elementos residuais e das variáveis que influenciam diretamente a formação da microestrutura.

Entre esses fatores, destaca-se o teor de magnésio (Mg), elemento fundamental no processo de nodulização da grafita. Os resultados apresentados na Tabela 5.1 indicam baixos teores de magnésio, condição particularmente crítica para o ferro fundido nodular, pois compromete a formação adequada da grafita esferoidal e favorece o surgimento de morfologias indesejáveis, como grafita degenerada, vermicular ou irregular. Esse resultado mostrou-se diretamente coerente com os achados microestruturais apresentados anteriormente, nos quais foram observadas regiões com degeneração da grafita, heterogeneidade da matriz e associação frequente com inclusões e defeitos de fundição.

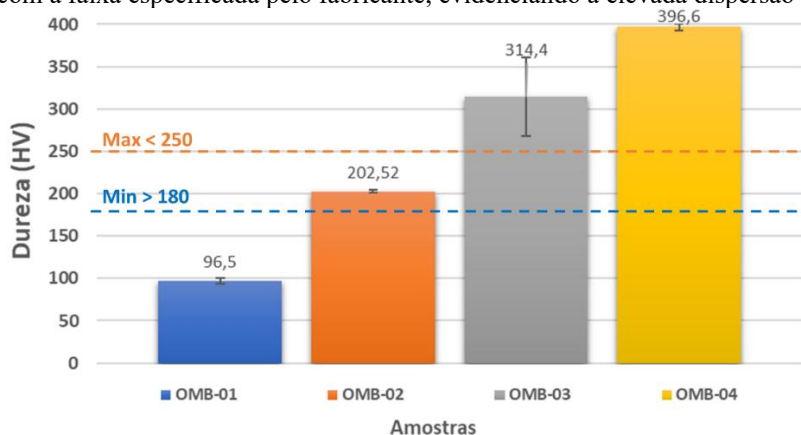
Dessa forma, a análise da composição química, quando interpretada em conjunto com os resultados microestruturais e de MEV/EDS, evidencia um quadro consistente de inadequação metalúrgica do material. Os baixos teores de magnésio comprometeram o processo de nodulização da grafita, favorecendo a formação de morfologias irregulares e degeneradas. Paralelamente, a elevada ocorrência de inclusões exógenas ricas em alumínio, especialmente de alumina ( $Al_2O_3$ ), provavelmente de material refratário, revelou uma condição desfavorável à sanidade do fundido, uma vez que tais partículas atuam como descontinuidades rígidas e concentradores de tensão. Somado a isso, a presença de elementos deletérios em teores relevantes contribuiu para a instabilidade do processo de grafitação e para a degradação da qualidade microestrutural do material. Em conjunto, esses fatores mostraram-se diretamente relacionados à degeneração da grafita, à heterogeneidade da matriz e à intensificação de defeitos internos, indicando que o comprometimento das ombreiras resultou da interação entre composição química inadequadamente controlada e deficiências no processo de fabricação.

## 5.6 Propriedades Mecânicas

Foram realizados ensaios mecânicos de tração, impacto Charpy e dureza em diferentes amostras das ombreiras ferroviárias, com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico do material e correlacioná-lo com os resultados obtidos nas etapas anteriores. De modo geral, os ensaios evidenciaram variações expressivas nas propriedades mecânicas entre as amostras analisadas. Considerando-se a heterogeneidade previamente identificada por meio das análises microestruturais, da caracterização por MEV/EDS e da avaliação da composição química, tais variações mostraram-se coerentes com o quadro metalúrgico já observado. Conforme descrito na literatura para ferros fundidos nodulares com microestruturas não homogêneas, a presença de variações locais de fase, defeitos de fundição e descontinuidades internas compromete a uniformidade do desempenho mecânico ao longo da peça (Glencoe, 1974).

A Figura 5.25 apresenta os valores médios de dureza Vickers obtidos para quatro amostras distintas. Observa-se dispersão significativa entre os resultados, com parte dos valores situada fora da faixa especificada pelo fabricante, equivalente aproximadamente ao intervalo entre 180HV e 250HV. As amostras OMB-01 e OMB-02 apresentaram microestruturas predominantemente ferríticas, enquanto as amostras OMB-03 e OMB-04 evidenciaram a presença de carbonetos, especialmente cementita, conforme já discutido nas análises microestruturais e confirmadas pelas imagens obtidas por microscopia óptica e MEV.

Figura 5. 25 - Valores de dureza Vickers (HV) obtidos para diferentes amostras de ombreiras ferroviárias, comparados com a faixa especificada pelo fabricante, evidenciando a elevada dispersão dos resultados.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

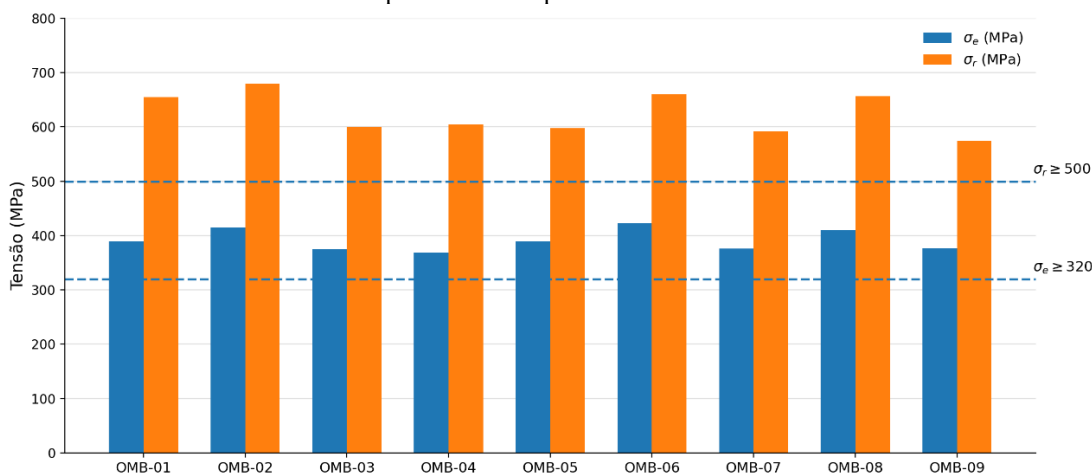
Nesse contexto, verifica-se que a variação observada nos valores de dureza está diretamente associada à heterogeneidade microestrutural do material, bem como a outros

aspectos microestruturais previamente discutidos. A presença de fases duras e frágeis, como a cementita, contribuiu de forma significativa para o aumento localizado da dureza em determinadas regiões das peças. Em contrapartida, a predominância da fase ferrítica na microestrutura da maioria das amostras resultou em valores de dureza inferiores, refletindo um comportamento mecânico menos resistente, porém potencialmente mais dúctil.

Assim, os resultados obtidos reforçam a influência direta da microestrutura nas propriedades mecânicas das ombreiras ferroviárias analisadas, evidenciando que a falta de controle microestrutural durante o processo de fabricação pode levar a variações significativas de desempenho mecânico e, conseqüentemente, comprometer a confiabilidade do componente em serviço.

A Figura 5.26 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração das amostras de ombreiras ferroviárias, em termos de tensão de escoamento e tensão de ruptura. Para fins de comparação, foram adotados como referência os valores mínimos usualmente associados às classes de ferro fundido nodular descritas nas normas ASTM A536 (2023), ABNT NBR 6916 (2018) e EN 1563 (2018), que convergem para requisitos mecânicos equivalentes, especialmente no que se refere ao limite de escoamento, à resistência à tração e ao alongamento. Nesse contexto, considera-se como parâmetro mínimo 320MPa para a tensão de escoamento( $\sigma_e$ ) e 500MPa para a tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ), associados a alongamento superior a 7%. Esses valores serviram como base comparativa para a análise do desempenho mecânico das amostras avaliadas.

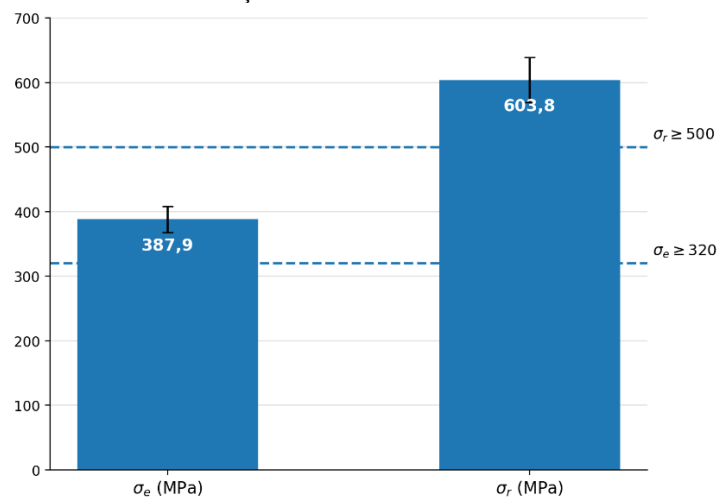
Figura 5. 26 - Resultados dos ensaios de tração das amostras de ombreiras analisadas, apresentando os valores de tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) e de tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) obtidos para cada amostra, em comparação com os limites mínimos estabelecidos pelas normas aplicáveis aos ferros fundidos nodulares.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Para todos os ensaios de tração realizados, os valores obtidos de tensão de escoamento e de tensão de ruptura mostraram-se superiores aos limites mínimos estabelecidos pelas normas aplicáveis, indicando conformidade do material com os requisitos normativos. Entretanto, observa-se uma dispersão significativa entre os resultados, o que pode estar associado à heterogeneidade microestrutural do material analisado. A Figura 5.27 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrão obtidos para essas propriedades mecânicas.

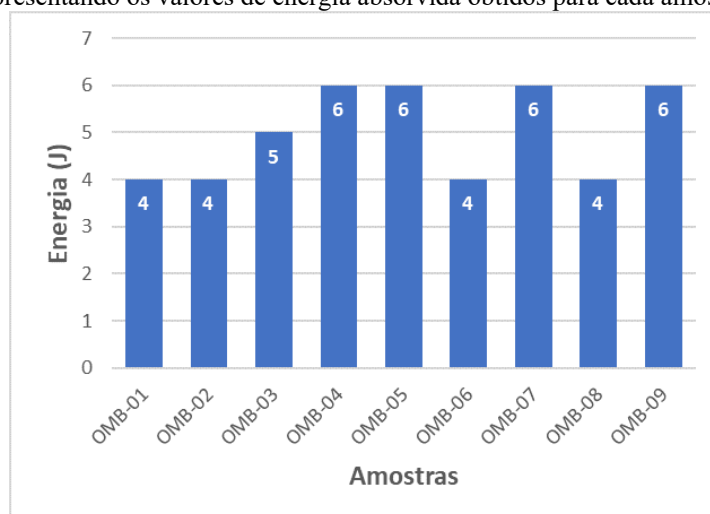
Figura 5. 27 - Valores médios e respectivos desvios padrão das tensões de escoamento ( $\sigma_e$ ) e de tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) obtidas nos ensaios de tração realizados nas amostras de ombreiras analisadas.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Embora as normas técnicas adotadas como referência não estabeleçam valores mínimos para a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy com entalhe em V, os resultados obtidos nessa etapa mostraram-se particularmente relevantes quando analisados em conjunto com os achados anteriores de composição química, microestrutura e MEV/EDS. Conforme apresentado na Figura 5.28, a energia absorvida pelas amostras variou aproximadamente entre 3J e 6J, valores que, para ferros fundidos nodulares, indicam baixa tenacidade ao impacto e, portanto, reduzida capacidade de absorção de energia antes da fratura. Esse comportamento é coerente com o quadro metalúrgico previamente identificado, marcado por baixos teores de magnésio, presença de elementos deletérios, grafita degenerada, inclusões não metálicas, carbonetos e outros defeitos de fundição, todos reconhecidamente capazes de favorecer a fragilização do material. Assim, os baixos valores de energia absorvida reforçam a interpretação de que as ombreiras analisadas apresentaram desempenho mecânico comprometido, condição particularmente crítica para aplicações submetidas a solicitações dinâmicas e eventuais carregamentos de impacto, nas quais a confiabilidade do componente em serviço depende diretamente de sua capacidade de resistir à nucleação e à propagação abrupta de trincas.

Figura 5. 28 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy realizados nas amostras de ombreiras analisadas, apresentando os valores de energia absorvida obtidos para cada amostra.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

De acordo com a literatura clássica, especialmente os dados apresentados por Davis (1996), ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica com aproximadamente 80% de nodulização apresentam valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy superiores a 10 J, mesmo em temperaturas moderadas, conforme ilustrado na Figura 3.6. Esse comportamento evidencia a influência direta do grau de nodulização na tenacidade ao impacto do material. Nessa mesma direção, Bortoleto e Machado (2025) destacam que a presença de heterogeneidades microestruturais, defeitos de fundição e alterações na sanidade do fundido compromete de forma significativa o desempenho mecânico de ombreiras ferroviárias, sobretudo em aplicações submetidas a solicitações severas de serviço.

No presente estudo, embora os valores obtidos nos ensaios de tração tenham se mostrado próximos ao esperado para o material, atendendo aos requisitos adotados como referência para limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) e limite de resistência à tração ( $\sigma_r$ ), os resultados do ensaio de impacto Charpy evidenciaram desempenho inferior ao indicado na literatura para ferros fundidos nodulares com microestrutura mais homogênea e adequado grau de nodulização. Esse contraste mostra que a avaliação isolada dos resultados de tração não é suficiente para representar, de forma abrangente, o comportamento mecânico do material, especialmente em situações envolvendo solicitações dinâmicas, impacto ou propagação instável de trincas. Em outras palavras, ainda que o material apresente resistência estática aparentemente satisfatória, sua capacidade de absorver energia antes da fratura mostrou-se limitada, indicando condição de tenacidade reduzida.

Esse comportamento torna-se mais compreensível quando analisado em conjunto com

os resultados previamente obtidos nas etapas de composição química, caracterização microestrutural, análise por MEV/EDS e análise de falha. Os baixos teores de magnésio identificados comprometeram o processo de nodulalização, favorecendo a formação de grafita degenerada e de uma microestrutura menos uniforme. Paralelamente, a presença de elementos deletérios, associada à elevada ocorrência de inclusões não metálicas, especialmente inclusões ricas em alumínio, contribuiu para a formação de descontinuidades internas e para a fragilização local do material. Somam-se a isso os macrorechupes, microrechupes, carbonetos e demais irregularidades microestruturais observadas ao longo das ombreiras, os quais atuam como concentradores de tensão e reduzem a capacidade do material de suportar deformação localizada sem fraturar.

Sob essa perspectiva, os resultados mecânicos obtidos neste estudo não devem ser interpretados de forma isolada, mas sim como consequência direta da condição metalúrgica do material. A composição química influenciou a evolução da microestrutura, e esta, por sua vez, condicionou o comportamento mecânico observado. Assim, a heterogeneidade microestrutural identificada ao longo das amostras explica não apenas a dispersão dos valores de dureza, mas também a combinação entre resistência à tração relativamente preservada e baixa tenacidade ao impacto. Esse cenário é particularmente crítico porque sugere que o material pode responder de maneira satisfatória sob carregamentos monotônicos, mas apresentar maior suscetibilidade à nucleação e à propagação rápida de trincas quando submetido a condições mais severas de serviço.

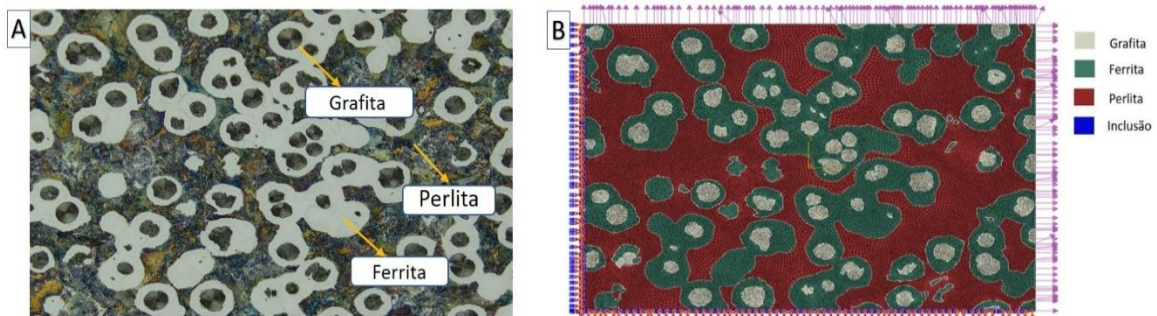
Ressalta-se, ainda, que o atendimento aos critérios de limite de escoamento e resistência à tração não garante, por si só, um comportamento mecânico seguro em operação. Em componentes ferroviários, nos quais podem atuar carregamentos cíclicos, solicitações dinâmicas e concentrações locais de tensão, a presença das heterogeneidades identificadas assume papel decisivo no desempenho do material. Nesse contexto, a ausência de ensaios específicos de fadiga constitui uma limitação importante do estudo, uma vez que defeitos como grafita degenerada, carbonetos, inclusões e descontinuidades internas tendem a reduzir significativamente a resistência do material e sua vida útil sob carregamentos repetidos, condição típica do ambiente ferroviário. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o desempenho das ombreiras analisadas esteve diretamente condicionado à interação entre composição química inadequadamente controlada, microestrutura heterogênea e defeitos de fabricação, fatores que, em conjunto, comprometeram a confiabilidade mecânica do componente em serviço.

## 5.7 Modelagem Computacional

As simulações numéricas foram realizadas sob carregamento mecânico uniaxial de tração, com a aplicação de uma tensão de 400MPa em duas das arestas externas de cada microestrutura avaliada. Esse nível de tensão foi adotado por representar uma condição compatível com as sollicitações típicas observadas em aplicações ferroviárias, acrescida de um fator de segurança, permitindo a avaliação do comportamento mecânico do material em uma situação conservadora.

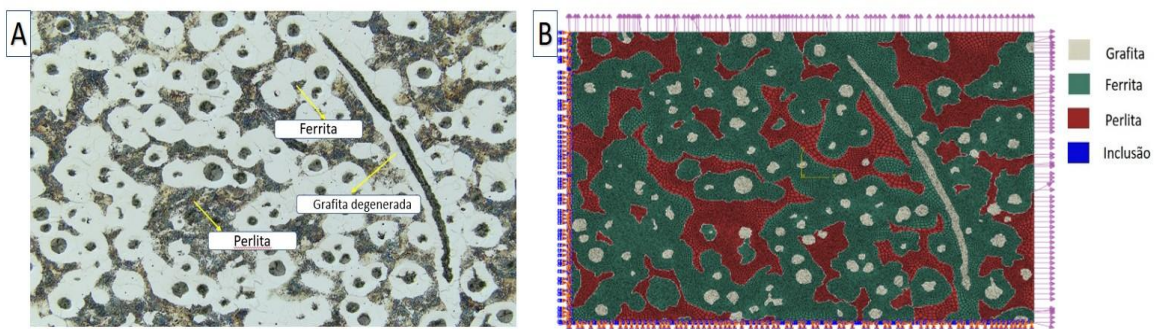
As Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam as microestruturas selecionadas para a análise e os respectivos modelos numéricos gerados pelo Método dos Elementos Finitos. As simulações foram conduzidas utilizando o *software* Abaqus, versão 2017, possibilitando a obtenção dos campos de tensão e a identificação de regiões de concentração de tensões associadas às heterogeneidades microestruturais.

Figura 5. 29 - (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada.



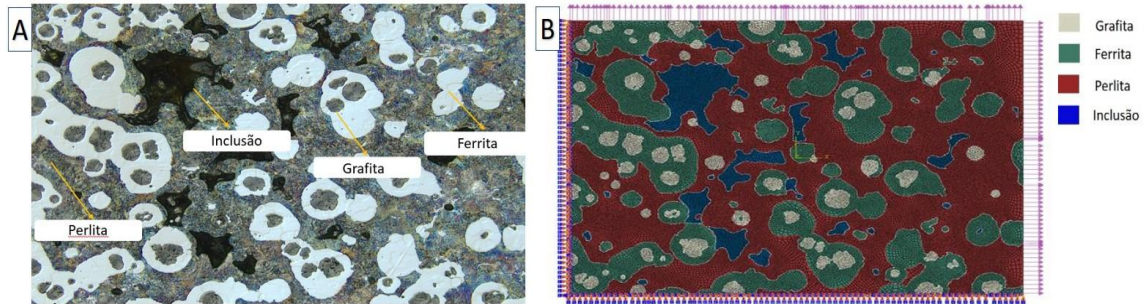
Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 30 (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 31 (a) Microestrutura de ombreira ferroviária em região com menor concentração de defeitos microestruturais. (b) Representação do modelo numérico obtido pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) a partir da microestrutura analisada.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Os resultados obtidos por meio das análises computacionais permitiram consolidar e aprofundar a interpretação construída ao longo de todo o estudo, evidenciando que a microestrutura exerceu influência decisiva sobre o comportamento mecânico das ombreiras analisadas. Em especial, a morfologia, a distribuição e o estado de sanidade da grafita mostraram-se determinantes para a formação de concentrações de tensão na matriz metálica, influenciando diretamente a nucleação e a propagação de trincas. Nesse sentido, a simulação numérica não apenas reproduziu tendências observadas experimentalmente, mas também forneceu uma explicação mecânica consistente para os mecanismos de falha identificados nas etapas anteriores.

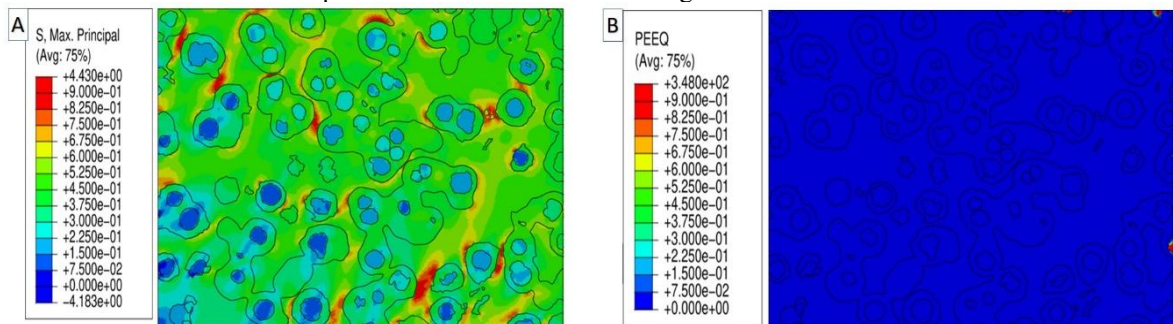
De modo geral, as simulações confirmaram que regiões caracterizadas pela presença de grafita degenerada, descontinuidades microestruturais e defeitos de fundição tendem a apresentar campos de tensão mais severos, configurando zonas preferenciais para o início e a propagação do dano sob carregamento mecânico. Em contrapartida, microestruturas mais homogêneas, com grafita predominantemente esferoidal e bem distribuída, apresentaram distribuição de tensões mais uniforme e menor concentração local, indicando condição estrutural mais favorável. Esses resultados demonstram que o desempenho do ferro fundido nodular não depende apenas de sua composição global ou de valores médios de propriedades mecânicas, mas do modo como os constituintes microestruturais estão organizados e interagem em escala local (Machado; Jales; Bortoleto, 2025).

Essa interpretação mostrou-se plenamente coerente com os resultados experimentais discutidos ao longo do trabalho. A análise fractográfica evidenciou a presença de marcas de “rio” Figura 5.1, típicas de mecanismos de fratura frágil, indicando propagação rápida da trinca em regiões estruturalmente críticas. A análise macroscópica revelou a ocorrência de macrorrechupes, enquanto a microscopia óptica e a caracterização por MEV/EDS

demonstraram a presença de microrrechupes, inclusões não metálicas, carbonetos, grafita degenerada e heterogeneidade da matriz, além de associação frequente entre inclusões e alterações locais na morfologia da grafita. Em paralelo, os resultados de composição química mostraram baixos teores de magnésio, presença de elementos deletérios e recorrência de inclusões ricas em alumínio, fatores que, em conjunto, explicam a formação de uma microestrutura instável e desfavorável do ponto de vista metalúrgico. Assim, a simulação completou a análise ao demonstrar que essas heterogeneidades, já identificadas morfologicamente e quimicamente, efetivamente traduzem-se em regiões de maior sollicitação mecânica e maior suscetibilidade à falha.

Os resultados apresentados na Figura 5.33 reforçam essa interpretação ao indicar que regiões com predominância de grafita esferoidal apresentaram desempenho mecânico superior, caracterizado por menores níveis de concentração de tensões e reduzida deformação plástica acumulada. Esse comportamento evidencia o efeito benéfico da esferoidização da grafita na redistribuição das tensões na matriz metálica, contribuindo para maior resistência à nucleação e à propagação de trincas.

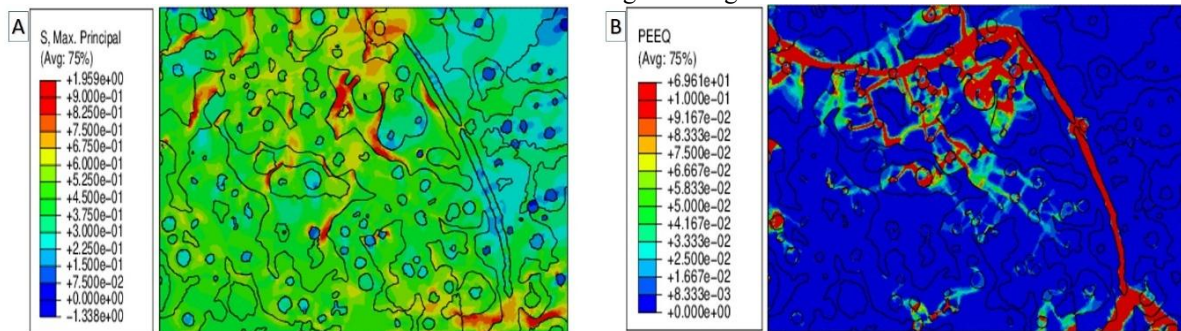
Figura 5. 32 (a) Distribuição das tensões principais máximas. (b) Distribuição da deformação plástica equivalente na microestrutura com grafita esferoidal.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

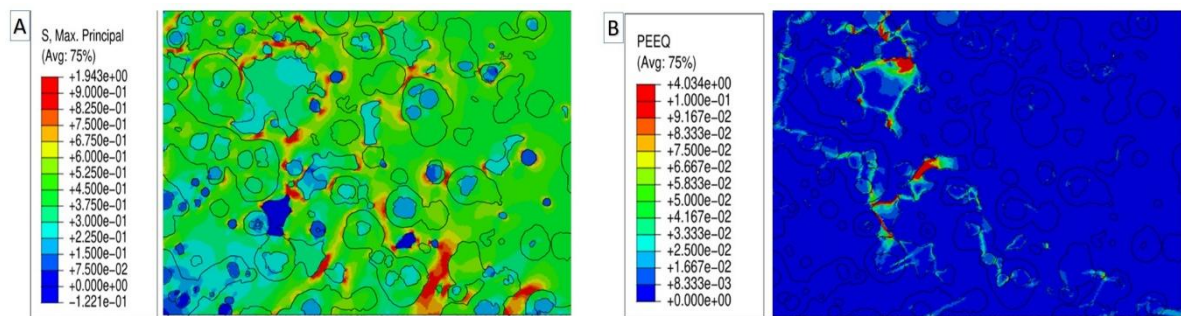
Em contraste, conforme ilustrado nas Figuras 5.34 e 5.35, regiões contendo lamelas de grafita ou grafita parcialmente degenerada apresentaram elevadas concentrações de deformação plástica, especialmente nas bordas dessas estruturas, nas quais também foram observados picos de tensões principais máximas. A presença de faixas contínuas de deformação acumulada nessas áreas indica que tais morfologias atuam como concentradores de tensão e como caminhos preferenciais para o avanço da trinca, aumentando a suscetibilidade do material à falha estrutural.

Figura 5. 33 (a) Distribuição das tensões principais máximas e (b) deformação plástica equivalente na microestrutura contendo grafita degenerada.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 5. 34 (a) Distribuição das tensões principais máximas e (b) deformação plástica equivalente na microestrutura com inclusões.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Essa convergência entre os resultados experimentais e numéricos também permitiu compreender, de forma mais ampla, o comportamento mecânico observado nos ensaios realizados. Embora os resultados de resistência à tração tenham se mantido próximos aos valores esperados para a classe do material, os ensaios de impacto Charpy evidenciaram baixa tenacidade, revelando que a capacidade do material de absorver energia antes da fratura estava severamente comprometida. Nesse contexto, a simulação mostrou-se particularmente esclarecedora ao indicar que, apesar de uma resistência estática aparentemente aceitável em determinadas condições, a resposta do material frente a solicitações mais severas foi limitada pela presença de regiões localmente fragilizadas e mais suscetíveis à concentração de tensões.

Sob essa perspectiva, a simulação por elementos finitos representou a etapa que completou e integrou a interpretação dos resultados, ao demonstrar que os defeitos identificados ao longo do trabalho não constituíam apenas irregularidades metalúrgicas ou microestruturais de caráter descritivo, mas sim fatores mecanicamente ativos, diretamente responsáveis pela intensificação das tensões locais e pela elevação da suscetibilidade à falha. Em outras palavras,

os resultados numéricos mostraram que a falha das ombreiras não pode ser compreendida como consequência de um defeito isolado, mas como resultado da atuação conjunta de uma composição química desfavorável, de uma microestrutura heterogênea e de uma sanidade metalúrgica deficiente.

Dessa forma, o presente estudo demonstrou que o desempenho das ombreiras ferroviárias analisadas foi condicionado por uma cadeia de eventos interdependentes: a composição química influenciou a microestrutura, a microestrutura definiu a forma de distribuição das tensões locais, e essa condição, por sua vez, governou o comportamento mecânico e a susceptibilidade à falha do componente. É justamente essa correlação entre composição química, microestrutura e resposta mecânica que confere robustez aos resultados obtidos. Assim, a etapa numérica não apenas encerra a discussão dos resultados, mas consolida a compreensão global do problema investigado, evidenciando de maneira inequívoca que a integridade das ombreiras está intrinsecamente ligada à qualidade metalúrgica do material e ao rigor do controle de fabricação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou de forma sistemática a integridade e o desempenho mecânico de ombreiras ferroviárias fabricadas em ferro fundido nodular, por meio de uma abordagem integrada que envolveu a análise da composição química, a caracterização microestrutural, a realização de ensaios mecânicos, a análise de falha e a simulação numérica por elementos finitos baseada em microestruturas reais. A aplicação conjunta dessas técnicas possibilitou uma compreensão abrangente dos mecanismos responsáveis pela degradação do desempenho mecânico e pela ocorrência de falhas prematuras no material avaliado.

Além das contribuições técnico-científicas, os resultados obtidos geraram impactos práticos relevantes. Como principal desdobramento deste estudo, foi possível subsidiar a elaboração de uma especificação técnica para fabricação e recebimento de ombreiras para dormentes de concreto, inexistente até então, estabelecendo critérios mais rigorosos de controle da composição química, da microestrutura e das propriedades mecânicas do componente. Essa especificação representa um avanço significativo no processo de aquisição do material, contribuindo diretamente para o aumento da segurança, da confiabilidade e da qualidade dos produtos utilizados pelas ferrovias da VALE SA.

Adicionalmente, os resultados deste trabalho fundamentaram a proposta de realização de testes em campo do componente, permitindo a avaliação comparativa do desempenho de diferentes fornecedores em condições reais de serviço. Essa etapa será essencial para validar a especificação técnica desenvolvida e para correlacionar os resultados laboratoriais com o comportamento do material em operação, fortalecendo o processo de qualificação de fornecedores e a tomada de decisão técnica.

Dessa forma, o estudo não apenas amplia o entendimento sobre a influência da microestrutura no desempenho mecânico do ferro fundido nodular, como também contribui de maneira direta para a melhoria dos processos industriais e para o aumento da confiabilidade operacional do sistema ferroviário.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi avaliada a sanidade e a integridade microestrutural de ombreiras ferroviárias do sistema Fastclip, fabricadas em ferros fundidos nodulares e utilizadas nas ferrovias da Vale S.A., por meio da correlação entre composição química, características microestruturais, propriedades mecânicas, análise de falha e simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos. A abordagem adotada permitiu verificar que o desempenho das ombreiras está diretamente associado à qualidade metalúrgica do material, ao controle do processo de fundição e à presença de descontinuidades microestruturais capazes de comprometer a integridade do componente em serviço.

A caracterização da composição química evidenciou desvios em elementos importantes para a obtenção de uma microestrutura nodular adequada, especialmente em relação ao controle de elementos residuais e deletérios. Baixos teores de magnésio, associados à presença de elementos como Pb, Sn, Bi, As, Te e Sb, indicaram condições desfavoráveis à nodularização da grafita, contribuindo para a formação de grafita degenerada, grafita em lamelas e demais irregularidades microestruturais. Dessa forma, constatou-se que o controle químico do material é um fator essencial para garantir a conformidade das ombreiras com os requisitos esperados para ferros fundidos nodulares aplicados em componentes ferroviários.

A análise microestrutural demonstrou que as amostras avaliadas apresentaram elevada heterogeneidade, com variações na morfologia, distribuição e sanidade dos nódulos de grafita, além da presença de inclusões não metálicas, microrrechupes, macrorrechupes, carbonetos e regiões com grafita degenerada. Esses aspectos indicam falhas associadas ao processo de fabricação e à qualidade do fundido, uma vez que tais descontinuidades atuam como concentradores de tensão e favorecem a nucleação e propagação de trincas. Assim, a avaliação da microestrutura mostrou-se fundamental para estabelecer critérios de aceitação ou rejeição das ombreiras com base na sua sanidade microestrutural.

Os ensaios mecânicos permitiram avaliar a influência da microestrutura nas propriedades do material. Embora os resultados de resistência à tração tenham se mantido próximos aos valores mínimos exigidos para a classe do ferro fundido nodular, os baixos valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy e a dispersão dos resultados indicaram baixa tenacidade e comportamento mecânico inconsistente. A variação nos valores de dureza também confirmou a heterogeneidade do material, refletindo a presença irregular de ferrita, perlita, carbonetos, inclusões e demais descontinuidades. Portanto, verificou-se que o

atendimento isolado aos requisitos de resistência mecânica não é suficiente para assegurar a integridade e o desempenho seguro das ombreiras em condições reais de operação.

A correlação entre composição química, microestrutura e propriedades mecânicas mostrou que as deficiências metalúrgicas observadas impactam diretamente o desempenho operacional das ombreiras ferroviárias. A presença de grafita degenerada, inclusões, carbonetos e defeitos de fundição reduziu a capacidade do material de absorver energia, favoreceu o comportamento frágil e contribuiu para a ocorrência de falhas prematuras. A análise de falha reforçou essa interpretação, ao evidenciar características associadas à propagação rápida de trincas em regiões fragilizadas, compatíveis com os defeitos observados na caracterização microestrutural.

As simulações numéricas complementares pelo Método dos Elementos Finitos confirmaram o efeito da microestrutura na distribuição de tensões. Regiões com grafita esferoidal e matriz mais homogênea apresentaram campos de tensão mais uniformes, enquanto regiões contendo grafita degenerada, inclusões, carbonetos e descontinuidades de fundição concentraram tensões mais elevadas. Dessa forma, a modelagem numérica reforçou os resultados experimentais, demonstrando que os defeitos microestruturais não representam apenas irregularidades morfológicas, mas atuam de forma efetiva na intensificação das tensões locais e no aumento da suscetibilidade à falha.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que as ombreiras ferroviárias avaliadas apresentaram comprometimento da sanidade e da integridade microestrutural, associado a desvios de composição química, heterogeneidade microestrutural, presença de defeitos de fundição e desempenho mecânico limitado, especialmente quanto à tenacidade. Essas características indicam que os componentes não atendem plenamente às condições desejáveis para aplicação ferroviária sujeita a carregamentos dinâmicos, impacto e solicitações cíclicas. Assim, recomenda-se maior rigor no controle da composição química, no processo de nodularização, na qualidade da fundição e na inspeção microestrutural das ombreiras, adotando critérios mais restritivos de aceitação com base na morfologia da grafita, presença de inclusões, carbonetos e defeitos internos.

Em síntese, este estudo atingiu o objetivo proposto ao demonstrar que a integridade das ombreiras ferroviárias do sistema Fastclip depende da interação entre composição química, microestrutura e propriedades mecânicas. A avaliação integrada desses fatores permitiu compreender os mecanismos responsáveis pela perda de desempenho do material e forneceu uma base técnica para o estabelecimento de critérios de controle e rejeição, contribuindo para

maior confiabilidade, durabilidade e segurança dos componentes utilizados na via permanente ferroviária. classe do material em questão, os ensaios de impacto Charpy apresentaram baixos valores de energia absorvida e elevada dispersão, evidenciando baixa tenacidade e comportamento mecânico inconsistente. Esse contraste mostrou que o atendimento isolado a parâmetros de resistência estática não é suficiente para garantir desempenho seguro em serviço. A variação observada nos valores de dureza também mostrou-se coerente com a heterogeneidade da microestrutura, refletindo a distribuição irregular de ferrita, perlita, carbonetos e demais descontinuidades ao longo do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, G.; TOKARSKI, T.; STEFANESCU, D. M.; GÓRNY, M.; CIOS, G.; SUAREZ, R. On the crystallography of the Mg–Si–Al nitride nuclei and of the graphite/nitride interface in spheroidal graphite iron. **Carbon**, v. 199, p. 170-180, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A536/A536M – Standard specification for ductile iron castings**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023. p.6

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23 – Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M – Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E92 – Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AREMA – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. **Manual for Railway Engineering**. Lanham, MD: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2023. p. 563.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6916: Ferro fundido nodular ou dúctil — Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 24p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1019-24 - Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Combustion and Inert Gas Fusion Techniques**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2. ed. Watertown, MA: K. J. Bathe, 2014. 1043 p.

BORTOLETO, E; MACHADO, N.K.V. **Caracterização microestrutural, da sanidade do fundido e das propriedades mecânicas de ombreiras ferroviárias para grampos FASTCLIP da Estrada de Ferro Carajás**. Ouro Preto: ITV, 2025. Relatório Técnico N002/2025.en

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. 992p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4.ed. revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva. São Paulo: Blucher, 2008.

DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: Cast Irons**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT PIM 05 – Placa de apoio de ferro fundido nodular**, In: Procedimento de Inspeção de

Materiais. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/procedimentos-para-inspecao/pim-005-placa-de-apoio-de-ferro-fundido-nodular.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1563: Founding Spheroidal graphite cast irons**. Brussels: CEN, 2018. p. 49

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2007.

GLENCOE. **Introduction to Physical Metallurgy**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1974. 696p.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2019. 344p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1083: Cast irons Spheroidal graphite cast irons Classification**. Geneva: ISO, 2018. p. 38

MACHADO, N. K. V.. **Análise de falha de ombreiras ferroviárias para grampos FASTCLIP da EFVM**. Ouro Preto: ITV, 2025. Relatório Técnico N006/2025.

MACHADO, N. K. V.; JALES, E. S.; BORTOLETO, E. M. Do nódulo à ruptura: uma análise 2D da microestrutura e seu impacto no comportamento mecânico do ferro fundido nodular. In: ENEMET – National Meeting of Metallurgical, Materials and Mining Engineering Students, 23., 2025, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2025. p. 675–685. DOI: 10.5151/2594-4711-42754.

NUNES, L. P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à Metalurgia e aos Materiais Metálicos**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010. 376p.

PERO-SANZ ELORZ, J. A.; FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, D.; VERDEJA, L. F. **Physical Metallurgy of Cast Irons**. Cham. Switzerland: Springer, 2018. 343p.

RUNDMAN, K. B.; IACONIELLO, F. **Cast Irons**. In: Materials Science and Materials Engineering. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016. p. 1-11.

SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: IPT, 1989. 205 p.

SANTOS, C. L. P.; CORRÊA, E. C. S.; LIMA, J. Avaliação prática da efetividade da nodularização in mold e sua aplicação na definição da microestrutura e das características dos ferros fundidos nodulares. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 19, e2786, 2022.

SOUZA SANTOS, A. B. Efeitos da composição química na produção de ferros fundidos nodulares. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 55., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2000.

STEFANESCU, D. M.; ALONSO, G.; LARRAÑAGA, P.; DE LA FUENTE, E.; SUAREZ, R. Recent developments in understanding nucleation and crystallization of spheroidal graphite in iron-carbon-silicon alloys. **Metals**, v. 10, n. 2, art. 221, 2020.

TRUDEL, A.; GAGNÉ, M. Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 36, n. 5,

p. 289–298, 1997.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.