

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –

Mestrado Profissional

Edgard Marcos Ribeiro

**“ESTUDO DO DESGASTE DO REFROTÁRIO DE MgO-C DA LINHA DE ESCÓRIA
DE PANEAS DE AÇO”**

Belo Horizonte

2025

Edgard Marcos Ribeiro

**“ESTUDO DO DESGASTE DO REFRAATÁRIO DE MgO-C DA LINHA DE ESCÓRIA
DE PANEAS DE AÇO”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Engenharia de Materiais / Materiais Cerâmicos

Orientador: Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos

Coorientador: Dr. Alamar Kasan Duarte

Belo Horizonte

2025

R484e

Ribeiro, Edgard Marcos.

Estudo do desgaste do refratário de MgO-C da linha de escória de
painéis de aço [recurso eletrônico] / Edgard Marcos Ribeiro.
– 2025.

1 recurso online (55 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Wander Luiz Vasconcelos.

Coorientador: Alamar Kasan Duarte.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Materiais – Teses. 2. Ciência dos materiais – Teses.

3. Aço – corrosão – Teses. 4. Microestrutura – Teses.

I. Vasconcelos, Wander Luiz. II. Duarte, Alamar Kasan.

III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

VI. Título.

CDU: 620(043)



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO **EDGARD MARCOS RIBEIRO**

Realizou-se, no dia 03 de dezembro de 2025, às 14:00 horas, Sala 2240, bloco 2, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 1ª defesa de dissertação, intitulada *ESTUDO DO DESGASTE DO REFRATÁRIO DE MgO-C DA LINHA DE ESCÓRIA DE PANEAS DE AÇO*, apresentada por EDGARD MARCOS RIBEIRO, número de registro 2023702474, graduado no curso de ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Wander Luiz Vasconcelos - Orientador (UFMG), Prof(a). Alamar Kasan Duarte (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais -), Prof(a). Débora Guimarães da Silva (Fundep), Prof(a). Leandro Rocha Lemos (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 03 de dezembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br WANDER LUIZ VASCONCELOS
Data: 26/02/2026 11:11:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Wander Luiz Vasconcelos (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALAMAR KASAN DUARTE
Data: 28/02/2026 16:12:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Alamar Kasan Duarte (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br DEBORA GUIMARAES DA SILVA
Data: 02/03/2026 13:25:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Débora Guimarães da Silva (Doutor)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEANDRO ROCHA LEMOS
Data: 03/03/2026 08:50:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Leandro Rocha Lemos (Doutor)

Dedico esse trabalho à Deus, que sempre esteve presente em minha caminhada, colocando pessoas especiais em minha trajetória, iluminando meu caminho e guiando meus passos.

Aos meus pais, Maria Geralda e Antônio Secundino, pelo amor incondicional, pelos exemplos de superação e perseverança, e que sempre citaram o valor da educação para o meu crescimento pessoal e profissional.

À minha esposa Carla, pelo apoio constante, oferecendo palavras de incentivo, escuta generosa e companhia nos dias difíceis.

Aos meus irmãos, meus melhores amigos e que sempre me apoiaram.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia."

(Robert Collier)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada.

Registro minha profunda gratidão ao meu orientador, **Prof. Wander Luiz Vasconcelos**, pelo apoio, paciência, compreensão e, sobretudo, pelas valiosas contribuições que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, **Alamar Kasan Duarte**, cuja participação foi fundamental para o desenvolvimento deste projeto, contribuindo de forma expressiva com conhecimento, tempo, paciência e sugestões indispensáveis para esta pesquisa. Estendo meus agradecimentos à equipe **Refralab**, pelo empenho na execução dos inúmeros ensaios e pelas discussões técnicas que enriqueceram este trabalho.

Aos professores e colegas do programa de pós-graduação, em especial à equipe do **Laboratório de Materiais Cerâmicos (LMC)**, pelo compartilhamento de conhecimento, colaboração nos testes realizados, disponibilidade e incentivo constante. Destaco, ainda, a contribuição efetiva da **Dra. Débora Guimarães da Silva** na revisão e sugestões de padronização técnica dos ensaios e da metodologia, o que certamente enriquecerá consultas futuras a este trabalho.

À minha família, pelo amor, compreensão e suporte incondicional em todos os momentos, especialmente à minha esposa **Carla Regina Ferreira**, pelo apoio e colaboração ao longo de toda a caminhada.

À **ArcelorMittal Monlevade**, pela oportunidade, apoio institucional e financeiro, bem como pela orientação, representada pelos gerentes **Alin Junior Machado Chaves**, **Eduardo Dias Pascoal**, **Vander Ferraz Neves** e pelo diretor **Fabiano Cristeli de Andrade**.

Por fim, agradeço aos amigos da **Gerência de Aciaria** – Helton Costa, Marcos Cunha, Fabio Cardoso, Natália Bicalho, Maikon Oliveira, Rafael Bueno, Igor Oliveira, Alexandre Bornacki, Dayvison Oliveira, Renita Bitaraes e Faraday Gandra – pelas discussões técnicas e por suportarem as minhas ausências em razão deste projeto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desgaste corrosivo observado na região de linha de escória de uma panela de aço..	16
Figura 2 - Fluxograma de produção da aciaria da ArcelorMittal Monlevade	19
Figura 3 - Panela de aço e suas principais regiões	20
Figura 4 - Zoneamento do revestimento da panela de aço em função dos fatores de desgaste....	21
Figura 5 - Esquema com os tipos de porosidade: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície	22
Figura 6 - Ilustração da permeabilidade em tijolos refratários	22
Figura 7 - Esquema representativo do ensaio do cone pirométrico equivalente. Sendo a) início e b) fim do teste.	23
Figura 8 - Comparativo de várias amostras de diferentes qualidades de MgO-C em um teste de oxidação.....	24
Figura 9 - À esquerda um esquema de montagem para teste de corrosão em forno rotativo e à direita uma foto do forno que realiza este tipo de ensaio.	24
Figura 10 - Diferentes tipos de termoclase que o material pode sofrer	25
Figura 11 - Classificação da magnésia de acordo com o tamanho de cristais.....	26
Figura 12 - Microestrutura de um tijolo de MgO-C, onde FM = magnésia eletrofundida, SM = sínter de magnésia, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e G = grafita	27
Figura 13 - Efeito da pureza dos agregados de MgO na taxa de corrosão do refratário	28
Figura 14 - Estrutura cristalina da grafita.....	29
Figura 15 - Efeito da grafita na estrutura do material refratário.....	29
Figura 16 - Efeito do antioxidante na perda de carbono.....	30
Figura 17 - Efeito da combinação de antioxidantes na profundidade de corrosão.....	30
Figura 18 - Efeito da relação CaO/SiO ₂ (basicidade) sobre a solubilidade de MgO na escória	31
Figura 19 - Efeito da adição de fluorita (CaF ₂) na solubilidade de MgO na escória.....	32
Figura 20 – Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.....	33
Figura 21 - Amostras dos refratários preparadas para realização do ensaio de oxidação	35
Figura 22 - Amostras inseridas no forno, antes e após o teste de corrosão estático.....	38

Figura 23 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T1, onde FM = magnésia eletrofundida e G = grafita.	40
Figura 24 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T2, onde FM = magnésia eletrofundida e IP = impurezas nas fronteiras de cristais.	41
Figura 25 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T3, onde FM = magnésia eletrofundida, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e Si = silício metálico.	42
Figura 26 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T4, onde FM = magnésia eletrofundida, SM = sínter de magnésia, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e G = grafita.	42
Figura 27 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T5, onde FM = magnésia eletrofundida e Si = silício metálico.	43
Figura 28 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T6, onde FM = magnésia eletrofundida e SM = sínter de magnésia.	43
Figura 29 - Amostras após o teste de oxidação	45
Figura 30 - Resultado do teste de resistência à oxidação.	46
Figura 31 - Amostras após o teste de corrosão estático.....	47
Figura 32 - Resultado do teste de corrosão estático.	47
Figura 33 - a) Amostras após o teste de corrosão dinâmico com a escória A; b) amostras após o teste de corrosão dinâmico com a escória B.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Solicitação dos refratários por regiões	20
Tabela 2 - Composição química de diferentes amostras de materiais refratários aplicados em linha de escória de panelas de aço	33
Tabela 3 - Composição química de duas escórias típicas de refino secundário.....	34
Tabela 4 - Resultados de densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica	44

RESUMO

Este estudo investiga o desempenho de materiais refratários de magnésia-carbono (MgO-C) aplicados na linha de escória de panelas de aço, etapa crítica do refino secundário na produção siderúrgica. O objetivo principal foi avaliar a resistência à corrosão desses materiais frente às escórias típicas do processo da ArcelorMittal Monlevade, correlacionando suas características microestruturais com a performance operacional. Foram analisadas seis amostras comerciais por meio de caracterização microestrutural (microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X), ensaios físicos (densidade e porosidade aparente) e testes de desempenho (oxidação e corrosão estática/dinâmica). A caracterização revelou diferenças significativas entre os materiais, especialmente quanto à qualidade da magnésia (eletrofundida versus sinterizada), distribuição de cristais, teor de impurezas (predominantemente óxido de cálcio e silício – CaO e SiO₂) e presença de aditivos antioxidantes. Os resultados indicaram que os materiais compostos exclusivamente por magnésia eletrofundida (T1, T2 e T5) apresentaram melhor desempenho geral, com menor evolução da porosidade após tratamento térmico e maior resistência à corrosão. A presença de Si metálico como antioxidante nos materiais T3 e T5 contribuiu para reduzir a taxa de oxidação, enquanto materiais com magnésia sinterizada (T4 e T6) exibiram maior desgaste e instabilidade química, devido ao menor tamanho de cristais do sinter de MgO e maior presença de impurezas como CaO e SiO₂. Nos testes de corrosão estática, observou-se maior agressividade da escória ácida em relação à escória básica com adição de fluorita, sendo o material T5 o mais resistente, seguido por T1 e T2. Ensaio dinâmico apresentou desgaste pouco mensurável, sugerindo a necessidade de métodos mais representativos, como testes em forno de indução, para simular condições reais de operação. Conclui-se que a seleção adequada de refratários para linha de escória deve considerar a pureza da magnésia, o tamanho dos cristais, a distribuição microestrutural e a presença de antioxidantes, fatores que impactam diretamente na vida útil e na segurança operacional. Este trabalho contribuiu para a otimização da escolha de materiais refratários, fornecendo subsídios técnicos para reduzir custos e aumentar a confiabilidade do processo siderúrgico.

Palavras-Chave: Painel de Aço. Microestrutura. Desgaste por Corrosão.

ABSTRACT

This study investigates the performance of magnesia-carbon (MgO-C) refractory materials applied to the slag line of steel ladles, a critical stage in secondary refining during steel production. The main objective was to evaluate the corrosion resistance of these materials against slags typical of the ArcelorMittal Monlevade process, correlating their microstructural characteristics with operational performance. Six commercial samples were analyzed through microstructural characterization (optical microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction), physical tests (bulk density and apparent porosity), and performance tests (oxidation and static/dynamic corrosion). The characterization revealed significant differences among materials, particularly regarding magnesia quality (fused vs. sintered), crystal distribution, impurity content (predominantly calcium oxide and silicon dioxide – CaO and SiO₂), and the presence of antioxidant additives. Results showed that materials composed exclusively of fused magnesia (T1, T2, and T5) exhibited superior overall performance, with lower porosity evolution after thermal treatment and higher corrosion resistance. The presence of metallic Si as an antioxidant in samples T3 and T5 contributed to reducing oxidation rates, while materials with sintered magnesia (T4 and T6) displayed greater wear and chemical instability due to lower crystal size and higher impurity levels. Static corrosion tests indicated that acidic slag was more aggressive than basic slag with fluorite addition, with material T5 being the most resistant, followed by T1 and T2. Dynamic tests showed minimal measurable wear, suggesting the need for more representative methods, such as induction furnace tests, to simulate real operating conditions. In conclusion, proper selection of slag-line refractories should consider magnesia purity, crystal size, microstructural distribution, and antioxidant presence, as these factors directly impact service life and operational safety. This work provides technical insights to optimize refractory selection, reduce costs, and enhance process reliability.

Keywords: Steel Ladle. Microstructure. Corrosion Wear.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.2 Justificativa	18
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Fluxo produtivo	19
2.2 Painelas de aço	20
2.3 Propriedades	21
2.3.1 Porosidade aparente	22
2.3.2 Permeabilidade	22
2.3.3 Refratariedade.....	23
2.3.4 Resistência a oxidação.....	23
2.3.5 Resistência à corrosão	24
2.3.6 Resistência ao choque térmico	25
2.4 Material refratário	26
2.4.1 Qualidade do MgO	26
2.4.2 Carbono	28
2.4.3 Antioxidante	29
2.5 Impacto do processo	31
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Visão geral da metodologia da pesquisa	32
3.2 Materiais	33
3.3 Preparação das amostras	35
3.4 Densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica	35
3.4.1 Densidade aparente.....	36
3.4.2 Porosidade aparente.....	36
3.4.3 Resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA)	37

3.5	Teste de oxidação	37
3.6	Teste de corrosão estático	38
3.7	Teste de corrosão dinâmico	38
3.8	Análise da microestrutura	39
4	– RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Análise da microestrutura	40
4.1.1	Amostra T1	40
4.1.2	Amostra T2	41
4.1.3	Amostra T3	41
4.1.4	Amostra T4	42
4.1.5	Amostra T5	42
4.1.6	Amostra T6	43
4.2	Densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica.....	44
4.3	Resistência à oxidação	45
4.4	Teste de corrosão estático	46
4.5	Teste de corrosão dinâmico	48
5	– CONCLUSÕES.....	49
5.1	Contribuições do trabalho	50
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52

1 – INTRODUÇÃO

A siderurgia ocupa posição central no desenvolvimento econômico e tecnológico, abastecendo setores como infraestrutura, construção civil, automotivo e energia. No processo de fabricação do aço, seja em usinas integradas ou semi-integradas, o aço líquido produzido no refino primário é vertido em panelas de aço, que desempenham papel essencial no transporte do metal até sua etapa de solidificação no lingotamento contínuo. Além de transportar o aço, as panelas são responsáveis por operações críticas de refino secundário, como ajuste da composição química, homogeneização térmica e remoção de inclusões não metálicas (ARAÚJO, 2005).

Para suportar temperaturas elevadas e permitir tratamentos sucessivos, as panelas são revestidas internamente com materiais refratários. Entre as regiões que compõem esse revestimento, a linha de escória é considerada a mais crítica, pois é onde ocorre a interface aço-escória. A escória, embora indesejável em etapas posteriores, é indispensável no refino secundário, atuando na proteção contra oxidação, na remoção de inclusões e na transferência de calor para o aço líquido no forno panela.



Figura 1 – Desgaste corrosivo observado na região de linha de escória de uma panela de aço.

Desgastes corrosivos (Figura 1) e/ou localizados na região de linha de escória são esperados e precisam ser monitorados continuamente, pois envolvem a segurança de pessoas e equipamentos no fluxo de produção. Além destas abordagens, uma elevada taxa de desgaste

implica em menor produtividade do equipamento com a redução de capacidade de aço dentro da panela, maior consumo de material refratário e menor disponibilidade de equipamentos para operação.

O material mais utilizado na linha de escória é o refratário de magnésia-carbono (MgO-C), devido à sua elevada refratariedade, resistência à corrosão e oxidação, baixa molhabilidade por escórias contendo silicatos e boa resistência ao choque térmico. Essas propriedades derivam de fatores como qualidade da magnésia (eletrofundida vs. sinter), tipo e teor de grafita, ligantes, adição de antioxidantes (Si, Al, SiC, B₄C) e parâmetros do processo de fabricação, que influenciam densidade e porosidade.

Contudo, a performance do refratário não depende apenas da sua formulação. O processo siderúrgico exerce influência direta, especialmente pela composição da escória utilizada no refino secundário. Escórias ácidas ou básicas com adição de fluorita (CaF₂) apresentam comportamentos distintos quanto à corrosão do MgO-C, devido à variação na basicidade (CaO/SiO₂) e na viscosidade, que afetam a solubilidade do MgO e a taxa de infiltração nos poros do refratário.

Apesar da ampla aplicação industrial, persistem lacunas na correlação entre microestrutura real (qualidade da magnésia, distribuição de cristais, impurezas, antioxidantes) e desempenho prático frente às escórias específicas de cada planta. Fichas técnicas nem sempre refletem a composição real, e métodos de ensaio convencionais (estáticos/dinâmicos) podem não reproduzir fielmente as condições de operação, exigindo abordagens mais representativas.

Diante disso, este trabalho busca responder: quais materiais MgO-C apresentam maior resistência à corrosão frente às escórias típicas da ArcelorMittal Monlevade e como essa performance se relaciona com sua microestrutura e propriedades físicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Avaliar quais materiais refratários da linha de MgO-C apresentam maior resistência à corrosão pelas escórias de processo da ArcelorMittal Monlevade.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os componentes da microestrutura de diferentes refratários de MgO-C aplicados em linhas de escória de panela de aço;
- Avaliar o desgaste por corrosão de cada um dos diferentes refratários de MgO-C utilizando uma escória ácida;
- Avaliar o desgaste por corrosão de cada um dos diferentes refratários de MgO-C utilizando uma escória básica com adição de fluorita;
- Correlacionar o resultado do desgaste por corrosão com a microestrutura de cada refratário testado.

1.2 Justificativa

Cientificamente, o estudo contribui para compreender a relação entre microestrutura e desempenho, fornecendo subsídios para otimização da formulação de refratários. Industrialmente, os resultados permitem reduzir custos, aumentar a vida útil das panelas e garantir segurança operacional, aspectos críticos para a competitividade do setor siderúrgico.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluxo produtivo

A ArcelorMittal Monlevade é uma usina siderúrgica integrada, com capacidade instalada de 1,25 milhões de toneladas por ano de aços longos com alta qualidade. O fluxo produtivo da Aciaria consiste em duas estações de dessulfuração (uma em torpedo e outra em panela de gusa), dois convertedores BOF (*Basic Oxygen Furnace*) com capacidade de 130 t (sendo um em operação e outro em *stand-by*), um forno panela e uma máquina de lingotamento contínuo de tarugo, conforme ilustrado na Figura 2.

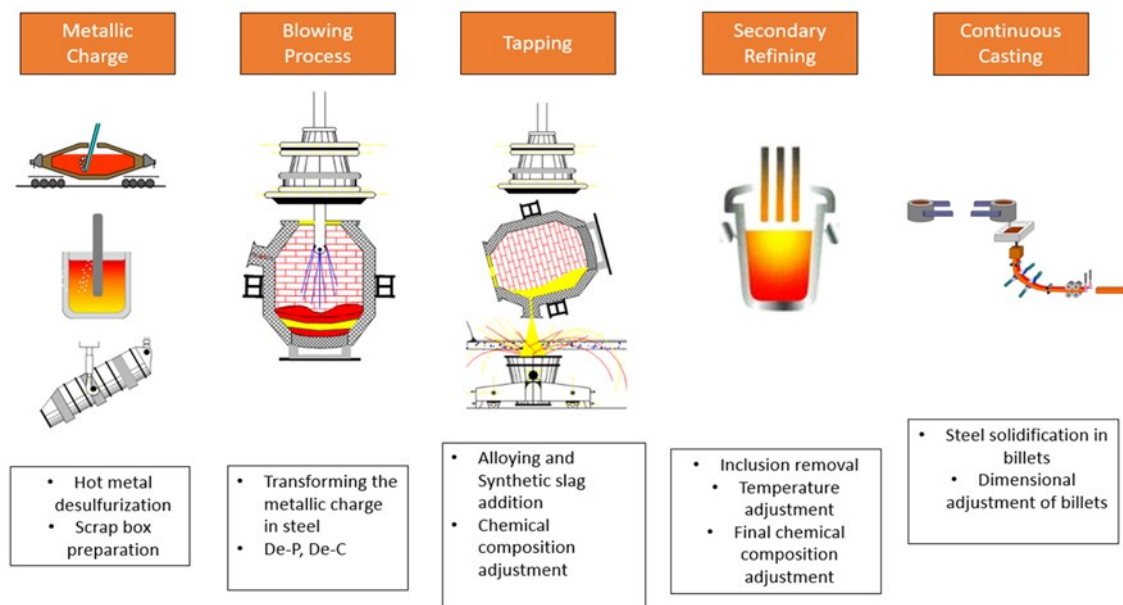


Figura 2 - Fluxograma de produção da aciaria da ArcelorMittal Monlevade (APOSTILA DE TREINAMENTO INTERNO DA ARCELORMITTAL MONLEVADE – ACADEMIA DA SIDERURGIA, 2016).

O gusa líquido dessulfurado é vertido nos convertedores após carregamento de sucata metálica. Inicia-se então o processo de refino primário com a injeção de oxigênio a vazão supersônica (CHAVES, 2006), tendo como objetivo principal a redução de carbono e fósforo. Após a etapa de refino primário realizada no BOF, o metal líquido é vazado para as panelas de aço, equipamento no qual acontece a etapa de refino secundário. Os materiais aplicados na linha de escória das panelas de aço são foco deste estudo e conhecer suas propriedades e as interações com o processo são fundamentais para uma operação segura e com performance otimizada.

2.2 Painelas de aço

As painelas de aço são equipamentos revestidos internamente por materiais refratários e tem as funções de manuseio do metal líquido, retirada de impurezas do aço, adição de elementos de liga e homogeneização de temperatura e composição química.

O tipo de material a ser aplicado na panela depende de alguns fatores e é definido por cada empresa de acordo com a exigência dos processos internos (DUARTE, 2012). Um esquema usual com as principais regiões pode ser visto na Figura 3.

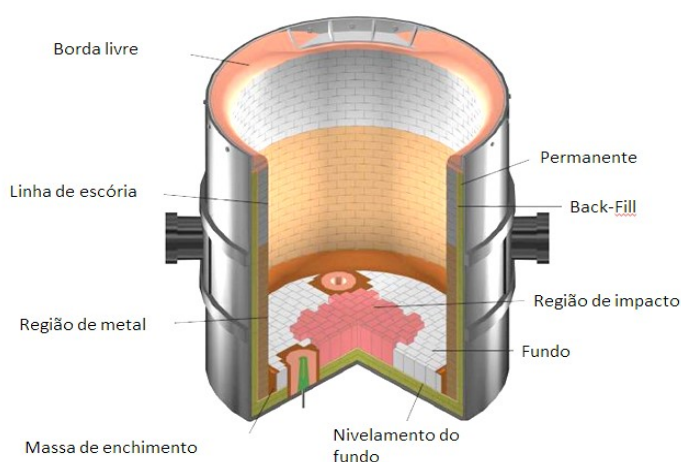


Figura 3 - Painela de aço e suas principais regiões (APOSTILA DE TREINAMENTO INTERNO DA ARCELORMITTAL MONLEVADE – ACADEMIA DA SIDERURGIA, 2016).

A Tabela 1 traz um resumo das principais solicitações que sofrem os refratários de acordo com a região da panela, bem como os principais materiais refratários aplicados em cada uma destas.

Tabela 1 - Solicitação dos refratários por regiões (APOSTILA DE TREINAMENTO INTERNO DA ARCELORMITTAL MONLEVADE – ACADEMIA DA SIDERURGIA, 2016).

Função Metalúrgica	Região	Solicitação ao Refratário		Tipo de Refratário
Transporte do aço líquido dos convertedores para o refino secundário e lingotamento. Recipiente para o refino secundário	Linha de metal, fundo e fundo impacto	Térmica	Alta temperatura - (até 1680 °C). Alto tempo de permanência do aço	Alumina-magnésio-carbono (AMC)
			Choque térmico por injeção de gases, operação descontínua.	Magnésia-alumina-carbono (MAC)
		Mecânica	Impacto do jato de aço e erosão do gás borbulhado	Magnésia-carbono (MgO-C)

		Química	Oxidação pelo oxigênio do aço e atmosfera. Ataque pelo fluxo de metal líquido	
Transporte do aço líquido dos convertedores para o refino secundário e lingotamento. Recipiente para o refino secundário	Linha de escória	Térmica	Alta temperatura - (até 1680 °C). Alto tempo de tratamento com aquecimento de escória.	Magnésia-carbono (MgO-C) - normalmente materiais de magnésia eletrofundida com grafita lamelar de alta qualidade, com adição de antioxidantes, ligado a resina e curado.
			Choque térmico por injeção de gases, operação descontínua e exposição do arco elétrico.	
		Mecânica	Erosão pelo arco elétrico do forno panela e pelo gás borbulhado	
		Química	Corrosão pela escória (análise, temperatura e tempo de tratamento). Corrosão por fluidificantes. Oxidação pelo oxigênio da atmosfera.	

Podemos identificar através da Figura 4 onde se aplica cada uma das solicitações abordadas anteriormente.

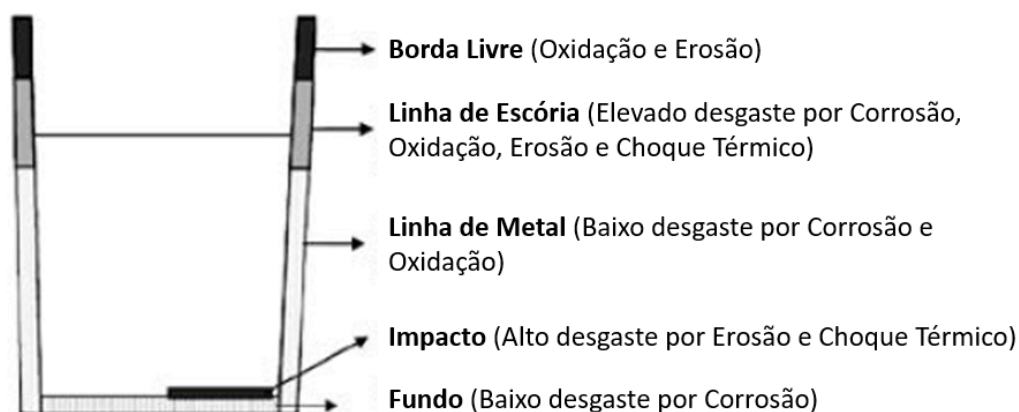


Figura 4 - Zoneamento do revestimento da panela de aço em função dos fatores de desgaste (LEITE, 2012 *apud* JANSEN, 2004).

2.3 Propriedades

Conforme abordado neste estudo, os materiais refratários sofrem diversas solicitações, sendo a região de linha de escória a mais crítica da panela. Freire (2016) e Kundu e Sarkar (2021) destacam como principais propriedades dos materiais aplicados nesta região:

- Baixa porosidade aparente;
- Baixa permeabilidade;
- Elevada refratariedade;

- Elevada resistência à oxidação;
- Elevada resistência à corrosão;
- Boa resistência ao choque térmico.

2.3.1 Porosidade aparente

A porosidade aparente, representada pela letra c na Figura 5, é medida pela relação de poros abertos em relação ao volume total, sendo seu resultado dado em percentual. A baixa porosidade aparente irá minimizar a penetração de escória ao interior do material refratário reduzindo assim a taxa de desgaste (SANTOS, 2016; BRAGANÇA, 2012).

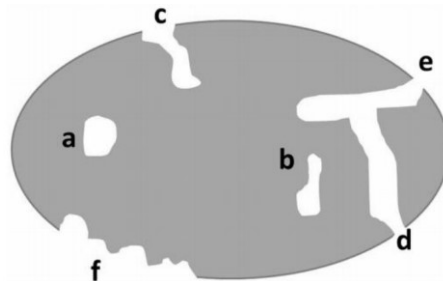


Figura 5 - Esquema com os tipos de porosidade: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície (SANTOS, 2016).

2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade é medida pela quantidade relativa de poros abertos, que estão aparentes a superfície do material e que são intercomunicantes, a qual pode ser medida através da vazão do ar por uma seção do material. Diferentemente da porosidade aparente, esta é dependente da comunicação entre os poros e sua morfologia conforme ilustrado na Figura 6 (DUARTE, 2005). Bragança (2010) diz que a baixa permeabilidade irá minimizar a penetração de escória ao interior do material refratário reduzindo assim a taxa de desgaste.

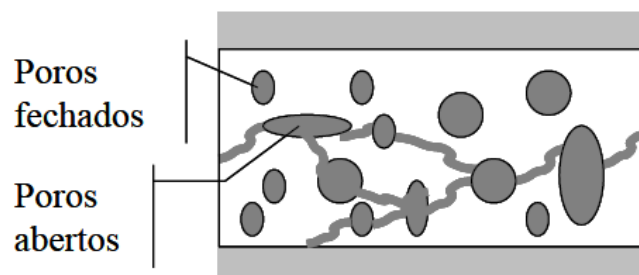


Figura 6 - Ilustração da permeabilidade em tijolos refratários (DUARTE, 2005).

2.3.3 Refratariedade

A refratariedade indica a temperatura a partir da qual o material começa a sofrer deformação plástica. Os materiais refratários devem suportar cargas de metal líquido em altas temperaturas sem se degradarem. Uma elevada refratariedade permite a operação contínua da panela no fluxo produtivo. A Figura 7 ilustra o ensaio do cone pirométrico equivalente (NASCIMENTO, 2022).

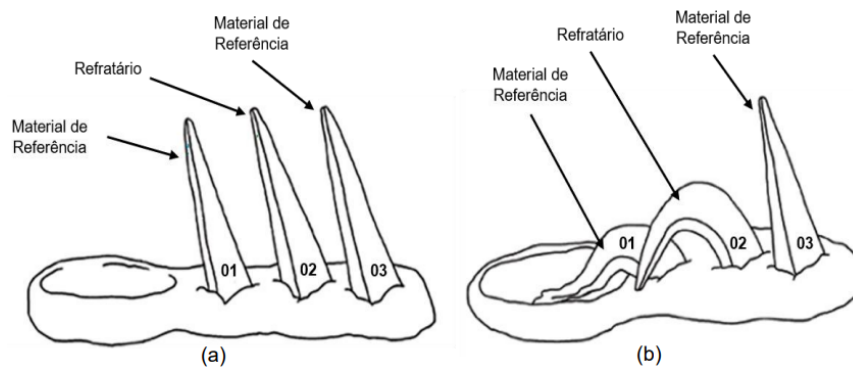


Figura 7 - Esquema representativo do ensaio do cone pirométrico equivalente. Sendo a) início e b) fim do teste. (NASCIMENTO, 2022).

No ensaio, o material a ser testado é colocado entre dois cones de referência com refratariedades conhecidas: um inferior e outro superior. A Figura 7b mostra que o material 02 apresenta refratariedade intermediária entre os materiais 01 (menor) e 03 (maior).

2.3.4 Resistência a oxidação

A resistência à oxidação indica a capacidade que o material tem sob determinada atmosfera de não se oxidar e perder suas propriedades físicas e químicas (QUINTELA, 2002). Os tijolos de magnésia-carbono aplicados na linha de escória de panela de aço, quando submetidos a uma atmosfera oxidante, têm a perda de carbono da face exposta, obtendo-se uma estrutura frágil e de fácil erosão e corrosão pelo metal e escória líquidos (RIGAUD, 1995). A Figura 8 ilustra diferentes tijolos de magnésia-carbono submetidos a um teste de oxidação (HOCQUET, 2007).

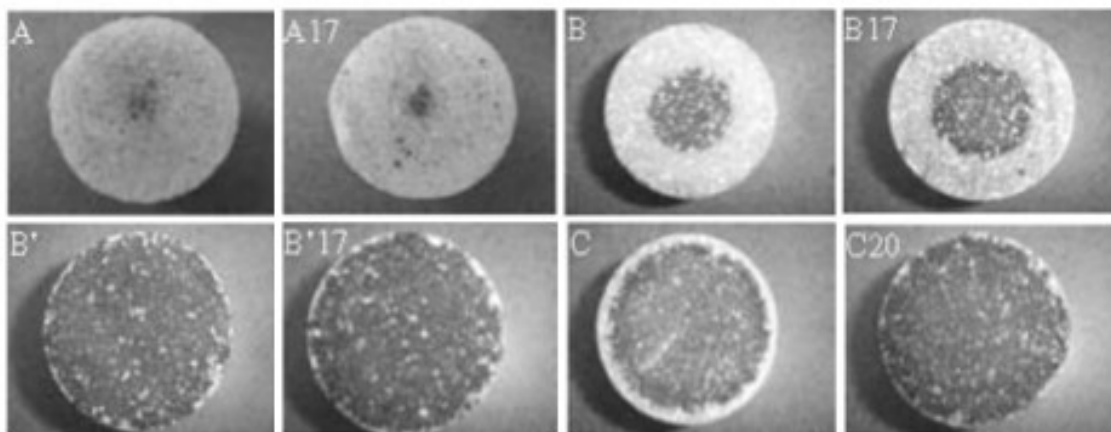


Figura 8 - Comparativo de várias amostras de diferentes qualidades de MgO-C em um teste de oxidação (HOCQUET, 2007).

O que observamos com o resultado do teste de oxidação apresentado anteriormente é que as amostras B', B'17 e C20 apresentam uma menor camada oxidada. Esta característica indica uma elevada resistência à oxidação, a qual é desejada para materiais de linha de escória.

2.3.5 Resistência à corrosão

A resistência à corrosão indica a taxa de desgaste de um material refratário quando este é submetido a um ataque químico, como o que acontece durante a permanência do aço e escória em contato com o revestimento refratário na panela. (MATTILA, 2002). Existem testes aplicados aos materiais refratários para mensurar qual o percentual do material refratário foi desgastado por corrosão em um determinado tempo. A Figura 9 mostra um exemplo de montagem para teste de corrosão em um forno rotativo, e o forno no qual o teste é realizado.



Figura 9 - À esquerda um esquema de montagem para teste de corrosão em forno rotativo e à direita uma foto do forno que realiza este tipo de ensaio.

O resultado do teste de corrosão pode ser dado em percentual, conforme a equação a seguir:

$$\text{Desgaste (\%)} = [(e_i - e_f) / e_i] \times 100, \text{ onde:}$$

Desgaste (%) = desgaste por corrosão;

e_i = espessura inicial (mm);

e_f = espessura final (mm).

Quanto menor for este valor, mais resistente é o material à corrosão. Vale ressaltar, que podem existir no processo diferentes tipos de escória, e cada uma delas pode implicar em uma taxa de desgaste por corrosão diferente ao material.

2.3.6 Resistência ao choque térmico

A resistência ao choque térmico é a capacidade que o material tem de resistir as variações de temperatura envolvidas no processo. Os materiais estão expostos o tempo todo a variação de temperatura durante o fluxo de operação, e uma boa resistência ao choque térmico irá garantir uma boa performance do material.

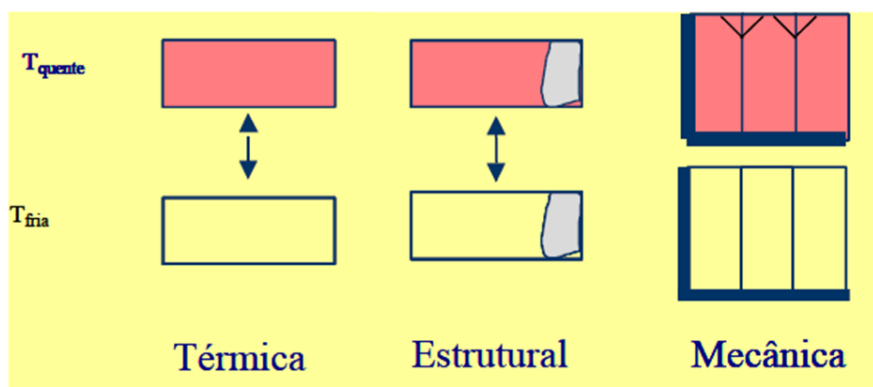


Figura 10 - Diferentes tipos de termoclase que o material pode sofrer (DUARTE, 2015).

Conforme ilustrado na Figura 10, a variação do gradiente de temperatura pode provocar diferentes termoclases no material, sendo ela térmica, estrutural ou mecânica (DUARTE, 2015). Qualquer tipo de termoclase implica em condições ruins para uma estabilidade do material, uma vez que trincas geradas perpendicularmente à face quente serão pontos de infiltração de metal e escória e maior facilidade de desgaste, e trincas quando paralelas e/ou em 45° a face quente

irão implicar em redução do residual refratário com a perda de espessura deste. Por este motivo, e em função das condições de processo em que os materiais de linha de escória são submetidos, uma boa resistência ao choque térmico é necessária.

2.4 Material refratário

A escolha do refratário com as melhores propriedades para a aplicação em linha de escória é um fator primordial. Entender as diferentes propriedades resultantes das matérias primas a serem selecionadas para a fabricação do refratário pode ser um diferencial no resultado de performance.

2.4.1 Qualidade do MgO

Leite (2014) cita que a magnésia ou óxido de magnésio (MgO) é a matéria-prima principal utilizada na fabricação de refratários básicos. Li *et al.* (2015) diz que ela pode ser obtida a partir da magnesita (MgCO₃) ou da água do mar (via MgCl₂). Além dessas rotas descritas, é importante destacar que alguns países também produzem óxido de magnésio a partir de salmouras naturais, uma fonte alternativa de magnésio utilizada em regiões com disponibilidade limitada de magnesita.

Após extração e tratamento, a magnésia é oferecida no mercado na forma de grãos sinterizados ou eletrofundidos conforme apresentado no Figura 11. Os grãos eletrofundidos têm maior densidade, são praticamente isentos de porosidade inter e intragranular, possuem maiores cristais de periclásio e menor teor de impurezas, fato que resulta na redução das reações químicas deste material com a escória e, conseqüentemente, aumenta o desempenho do revestimento refratário.

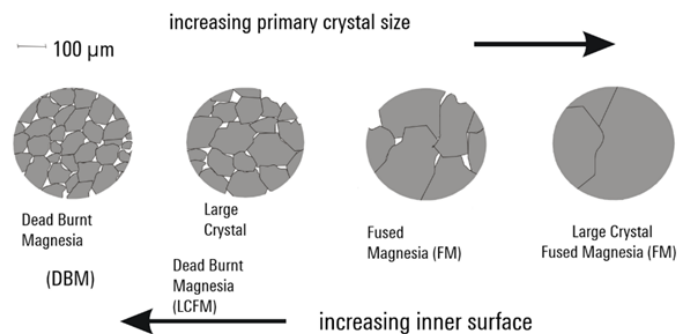


Figura 11 - Classificação da magnésia de acordo com o tamanho de cristais (REFRATECHNIK, 2023).

À medida que os tamanhos de cristais de MgO aumentam, tem-se uma magnésia de elevada qualidade. Os processos para obtenção de uma magnésia de cristais grandes (*large crystal*) utilizam fornos de eletrofusão, onde tempos maiores de fabricação e conseqüentemente custos maiores estão envolvidos. Em decorrência disso, as elevadas propriedades entregues por essa qualidade de magnésia acompanham um elevado custo. Kujur *et al.* (2018) acrescenta que os cristais maiores têm a desvantagem de degradar as propriedades de resistência ao choque mecânico e térmico devido ao número reduzido de contornos de cristais e menor resistência à propagação de trincas.

Por outro lado, tem-se também os agregados de sínter de MgO que apresentam menores tamanhos de cristais (sínter de MgO). Estes materiais podem apresentar um maior percentual de impurezas (CaO e SiO₂) entre os seus grãos, que também tem correlação com o aumento de superfície interna. Landy (2004) cita que estas impurezas quando em operação a elevadas temperaturas formam fases líquidas, que facilitam o caminho à penetração de escória, aumentando a taxa de corrosão do material.

A Figura 12 ilustra a microestrutura de um tijolo de MgO-C, contendo partículas maiores de magnésia eletrofundida (FM) e sínter de magnésia (SM). A região da matriz, contendo as menores partículas, tem-se a presença de lamelas de grafita com partículas menores de magnésia eletrofundida e sínter de magnésia. É possível observar ainda na região de contornos dos cristais (região interna das partículas maiores) a presença de impurezas, sendo predominantemente de óxidos de cálcio e silício (CaO e SiO₂), que se mostram em maior proporção no grão de sínter, permeando toda a estrutura.

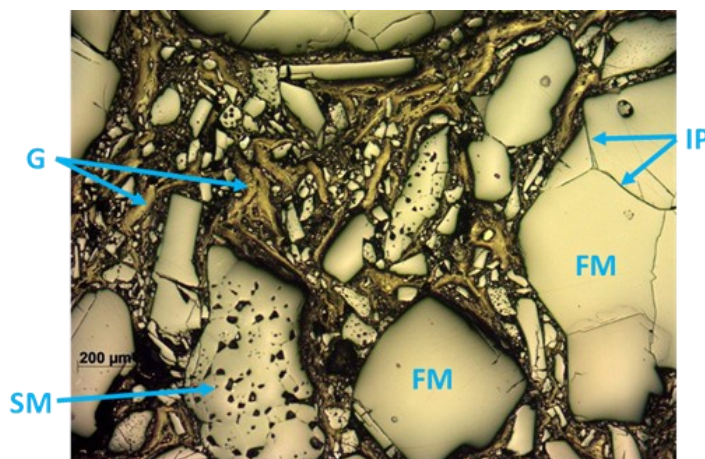


Figura 12 - Microestrutura de um tijolo de MgO-C, onde FM = magnésia eletrofundida, SM = sínter de magnésia, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e G = grafita.

A quantidade de impureza presente no grão de MgO tem impacto direto na profundidade de corrosão que o material irá sofrer, conforme pode ser visto na Figura 13 (ANAN, 2001). Os grãos mais puros de MgO apresentam maior resistência à corrosão, por isto, para aplicações em linha de escória de panela de aço eles são os mais utilizados.

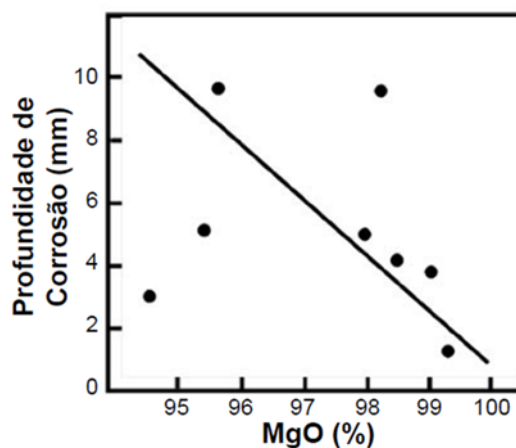


Figura 13 - Efeito da pureza dos agregados de MgO na taxa de corrosão do refratário (ANAN, 2001).

2.4.2 Carbono

O carbono é um importante elemento que compõem os refratários MgO-C. Zhu *et al.* (2018) cita que as principais razões para o uso de carbono em refratários na siderurgia são: alta refratariedade e estabilidade térmica em condições não-oxidantes; baixa molhabilidade por líquidos polares, em particular escórias de silicatos; aumento da resistência ao choque térmico, pelo aumento da energia de fratura e pela alta condutividade térmica; facilidade de impregnação em estruturas porosas quando usados na forma de ligantes orgânicos.

O carbono pode ser proveniente de diferentes fontes, sendo as principais:

- a grafita, responsável por aumentar a resistência ao ataque por escória e ao choque térmico;
- o piche pode ser usado como ligante de fases ou como agente de impregnação para preencher poros;
- as resinas são comumente utilizadas como ligantes;
- o negro de fumo é considerado como um material de preenchimento.

Nos tijolos de MgO-C, a grafita e a resina são as principais fontes de adição de carbono. A Figura 14 mostra que grafita apresenta estrutura cristalina lamelar, a qual confere características anisotrópicas a este material, uma vez que as propriedades ao longo da camada planar (ligações covalentes fortes) são distintas daquelas obtidas na região basal (forças de Van der Waals).

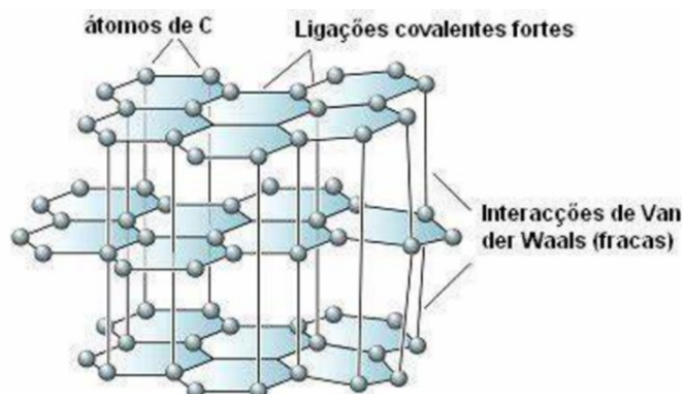


Figura 14 - Estrutura cristalina da grafita (ELECTRICAL E-LIBRARY, 2019).

Este tipo de estrutura confere a grafita uma maior resistência à molhabilidade, diminuindo a capacidade de penetração de escória na microestrutura refratária e diminuindo o desgaste deste (DUARTE, 2015). A Figura 15 ilustra dois materiais refratários, sendo a) com presença da grafita entre os cristais e b) sem a presença da grafita. Nota-se neste último, a maior penetração de escória entre os cristais.

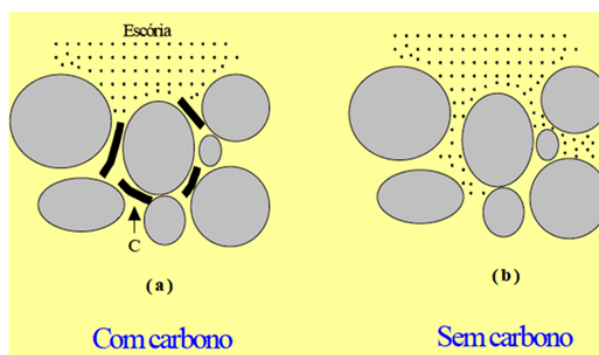


Figura 15 - Efeito da grafita na estrutura do material refratário (DUARTE, 2015).

2.4.3 Antioxidante

Jansen (2004), Luz *et al.* (2016) e Sakar (2016) mostram que a presença de antioxidantes também é um fator importante na elaboração dos materiais refratários. Conforme abordado ao longo deste trabalho os materiais estão expostos constantemente à oxidação, e o carbono tende

a ser o principal afetado neste processo. Se não houver um controle da perda de carbono, a proteção à infiltração de escória que é dado por ele será perdida e aumentará o desgaste do material refratário.

Diferentes tipos de pós-metálicos e compostos são usados para atuar na redução da perda de carbono (JANSEN, 2004). Também pode-se variar a proporção deles. A Figura 16 apresenta alguns antioxidantes e a influência deles na perda de carbono.

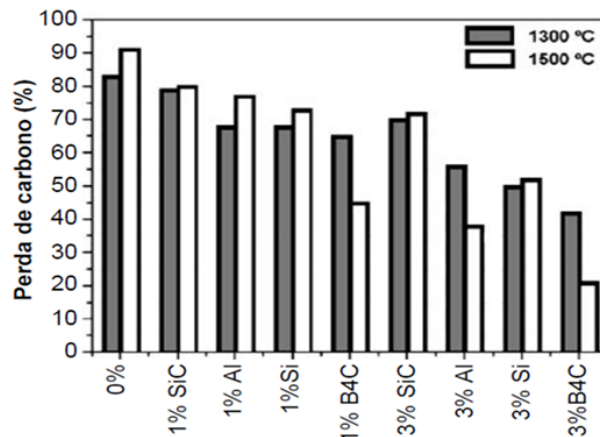


Figura 16 - Efeito do antioxidante na perda de carbono (JANSEN, 2004).

Gokce *et al.* (2008) confirmam o observado na Figura 16, de que dentre os antioxidantes Al, Si, SiC e B₄C, este último é o mais eficaz. Cada um destes antioxidantes traz benefícios a estrutura refratária. É comum a aplicação combinada de alguns deles propiciando resultados ainda melhores ao material (HUNOLD, 1999). A Figura 17 mostra o resultado da combinação de alguns deles e o impacto na profundidade de corrosão.

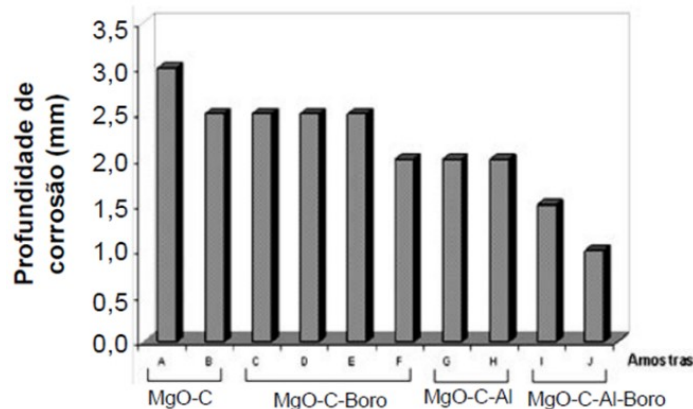


Figura 17 - Efeito da combinação de antioxidantes na profundidade de corrosão (HUNOLD, 1999).

2.5 Impacto do processo

O processo ao qual o refratário está submetido acarreta condições de maior solicitação ao material, podendo propiciar taxas de desgaste acentuadas.

Podemos destacar a temperatura de operação, que quando elevada vai propiciar uma maior taxa de dissolução do refratário. Os elevados tempos de tratamento vão contribuir para o processo de corrosão e erosão, uma vez que mantem o refratário exposto por um maior período. Volume de escória baixo favorece exposição do arco elétrico e ocorrências de trincas no material por choque térmico, e um volume de escória alto irá absorver uma elevada energia proveniente do arco elétrico, elevando a temperatura da escória, com aumento à dissolução do refratário.

Akkurt (2003) e Borges (2017) citam que as escórias contam ainda com um fator crítico ao desgaste refratário, que está relacionado a sua basicidade e viscosidade. Zhang (2000) aborda que a razão CaO/SiO_2 da escória exerce considerável influência no desgaste do revestimento refratário das panelas, fato que pode ser comprovado pela influência deste parâmetro na solubilidade de MgO (Figura 18). O desgaste químico aumenta linearmente com a temperatura e de forma não-linear com a redução da basicidade.

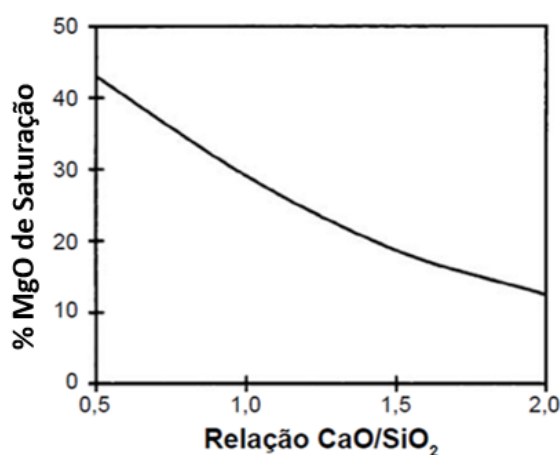


Figura 18 - Efeito da relação CaO/SiO_2 (basicidade) sobre a solubilidade de MgO na escória (ZHANG, 2000).

A viscosidade da escória afeta diretamente a capacidade de dissolução e de infiltração da fase líquida na estrutura dos refratários e, conseqüentemente, ela pode aumentar ou reduzir a taxa de corrosão destes materiais. Esta propriedade varia, principalmente, de acordo com a temperatura e a concentração de formadores e modificadores de rede (ou fundentes) presentes na fase líquida.

No processo de refino primário e secundário do aço geralmente utiliza-se fluorita (CaF_2) com a finalidade de reduzir o ponto de fusão da escória e melhorar as condições cinéticas para a absorção de inclusões (BRAGANÇA, 2012; BORGES, 2017). Entretanto, este efeito da fluorita facilita a solubilidade do MgO na escória conforme mostra a Figura 18 (ZHANG, 1994).

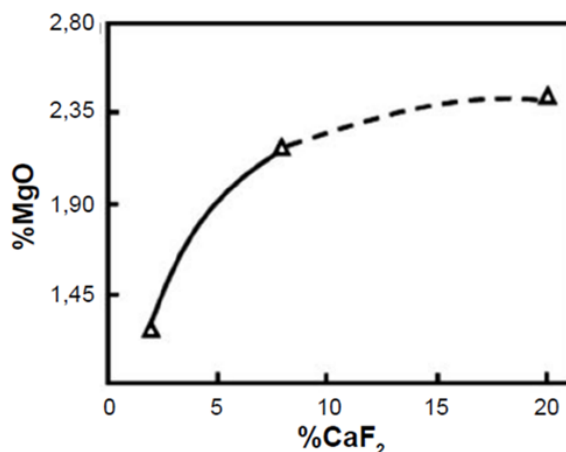


Figura 19 - Efeito da adição de fluorita (CaF_2) na solubilidade de MgO na escória (Adaptado de ZHANG, 1994).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Visão geral da metodologia da pesquisa

A metodologia empregada neste trabalho foi estruturada de forma sequencial, visando garantir a rastreabilidade completa das etapas envolvidas na investigação experimental. O estudo contemplou desde a seleção e caracterização das amostras de refratários e escórias até a realização de ensaios físico-mecânicos, termoquímicos e microestruturais, culminando na análise comparativa do desempenho dos materiais.

É importante destacar que este estudo possui caráter predominantemente qualitativo, dado que o número de amostras disponíveis para alguns materiais foi limitado. Tal limitação decorre do fato de que os tijolos refratários utilizados estavam diretamente vinculados a testes industriais de campo, nos quais a aplicação de determinados revestimentos envolvia riscos operacionais e econômicos. Caso o desempenho desses materiais em teste não fosse satisfatório, haveria geração de um volume significativo de revestimentos que não poderiam ser utilizados em serviço, restringindo, portanto, a quantidade de amostras destinadas à investigação laboratorial.

Diante dessas condições práticas de fornecimento e disponibilidade, optou-se por uma abordagem metodológica que privilegia a análise comparativa qualitativa, com foco na compreensão dos mecanismos de desgaste, comportamento microestrutural e variáveis de desempenho dos diferentes refratários avaliados.

Para facilitar a visualização do encadeamento das etapas executadas, apresenta-se na Figura 20 um fluxograma sintetizando a rota experimental adotada. Essa representação gráfica visa auxiliar o leitor na compreensão do fluxo metodológico desde o recebimento das amostras até a interpretação dos resultados.

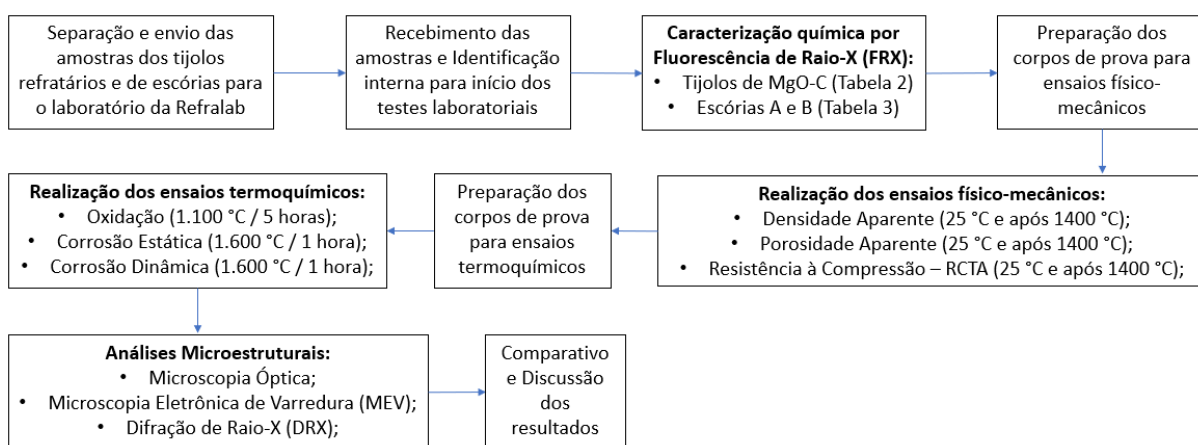


Figura 20 – Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.

3.2 Materiais

Amostras de tijolos refratários de linha de escória de panela de aço de diferentes fornecedores e amostras de escória utilizadas no processo produtivo da ArcelorMittal Monlevade foram enviadas para laboratório externo de análises refratárias. Importante citar que a Ficha de Dados Técnicos de todos estes materiais cita que são refratários de magnésia-carbono composto apenas por magnésia eletrofundida. As composições químicas dos materiais refratários estão apresentadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Composição química de diferentes amostras de materiais refratários aplicados em linha de escória de painéis de aço.

Amostra	C	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO
T1	10,07	1,26	0,60	0,23	0,66	0,01	97,16	0,07
T2	9,74	1,19	0,56	0,19	0,46	0,01	97,51	0,07
T3	13,46	1,20	5,57	0,30	0,82	0,04	92,01	0,04

T4	12,60	1,01	0,84	0,70	0,88	0,10	96,38	0,08
T5	12,65	1,89	1,56	<0,01	0,22	0,01	96,22	0,10
T6	12,93	1,04	1,22	0,29	1,14	<0,01	96,24	0,05

Valores de Na₂O, K₂O, P₂O₅ e TiO₂ para todas as amostras apresentaram valores abaixo de 0,01%.

Conforme apresentado na Tabela 2, nota-se que são materiais de magnésia-carbono, sendo que as amostras T1 e T2 apresentam um menor percentual de carbono comparado aos demais materiais. As amostras T3 e T5 se destacam pela presença de antioxidante de Si metálico, evidenciada neste ensaio de análise química pela sílica (SiO₂), sendo a amostra T3 aquela com maior aplicação do antioxidante.

A Tabela 3 mostra o resultado de análise química das escórias utilizadas nos testes.

Tabela 3 - Composição química de duas escórias típicas de refino secundário.

Escória	CaO	SiO₂	Al₂O₃	MgO	Fe₂O₃	K₂O	Cr₂O₃	P₂O₅	CaF₂	CaO / SiO₂
A	30,01	48,35	2,49	13,98	4,07	0,2	0,19	0,12	<0,41	0,62
B	27,93	20,92	6,10	11,10	3,65	1,19	0,05	0,30	27,74	1,34

Valores de MnO, Na₂O e TiO₂ para todas as amostras apresentaram valores residuais.

As escórias A e B foram escolhidas para os testes por representarem condições químicas contrastantes que influenciam diretamente o desgaste dos refratários. A escória A apresenta uma baixa relação CaO/SiO₂ (0,62), caracterizando-se como ácida, o que tende a aumentar a solubilidade do MgO e intensificar a corrosão do revestimento. Já a escória B possui uma relação CaO/SiO₂ mais elevada (1,34), indicando caráter básico, além de um teor significativo de fluorita (CaF₂ = 27,74%), que reduz o ponto de fusão da escória e aumenta sua fluidez, favorecendo a infiltração e o ataque químico ao refratário.

A escolha dessas duas composições permite avaliar o comportamento dos materiais refratários frente a diferentes cenários de basicidade e viscosidade, simulando condições críticas encontradas no processo siderúrgico. Além disso, é importante destacar que, na prática operacional da Arcelor Mittal Monlevade, os refratários são expostos de forma contínua às duas escórias, ora à escória A e ora à escória B, em função do mix de aço produzido, não havendo segregação de equipamentos por tipo de escória.

Ambos os resultados de composição química foram determinados pelo método de fluorescência

de raios X no equipamento da marca PANALYTICAL, modelo MAGIX - Tubo de Rh, do Laboratório da FRX Service.

3.3 Preparação das amostras

As amostras de tijolos refratários foram preparadas de acordo com procedimentos padronizados, observando-se as diretrizes das normas técnicas pertinentes a cada tipo de ensaio. As normas ABNT NBR específicas utilizadas em cada etapa experimental são detalhadas ao longo das subseções seguintes. A Figura 21 ilustra os corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 50 mm preparados para os ensaios de resistência à compressão e de oxidação.

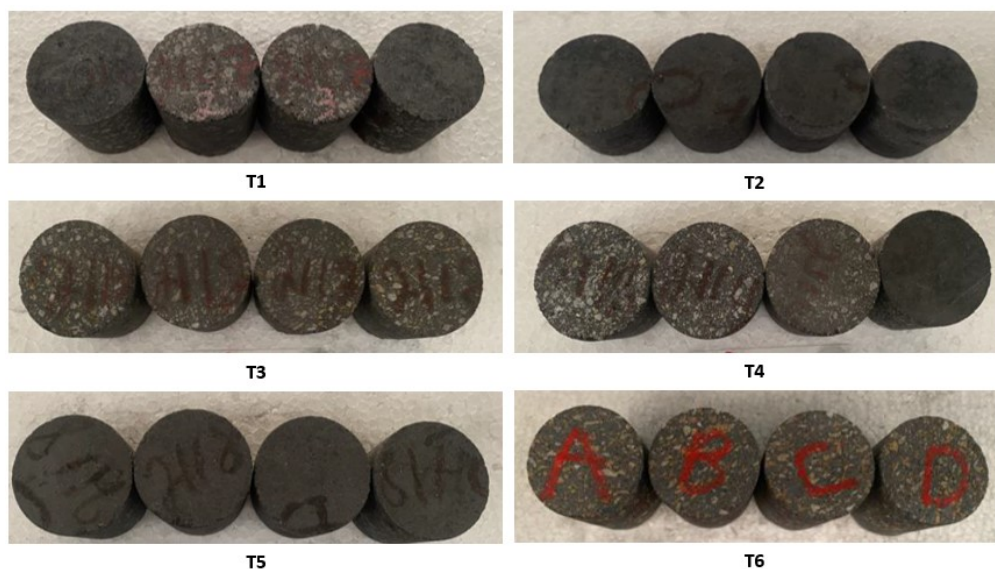


Figura 21 - Amostras dos refratários preparadas para realização do ensaio de oxidação.

3.4 Densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica

As amostras de tijolos refratários para os ensaios de densidade aparente e porosidade aparente, foram preparadas conforme a norma ABNT NBR ISO 5017, e identificadas conforme o tipo de material. Os corpos de prova para estes ensaios foram cubos de 40x40x40 mm, os quais foram submetidos a ensaios de densidade e porosidade aparente na condição como recebidos e após exposição a 1400 °C por 1 hora em atmosfera redutora.

Os tratamentos térmicos foram feitos em mufla estacionária do fabricante JUNG com capacidade de temperatura de 1400 °C. Para os ensaios de densidade e porosidade aparente foi

utilizado uma balança analítica da marca SHIMADZU, modelo UX4200H, com capacidade de 4.200 gramas.

3.4.1 Densidade aparente

Consiste na medição entre a massa seca do material e o volume exterior, medidos nos ensaios em g/cm^3 .

$$DA = M_{\text{seca}} / V, \text{ onde:}$$

DA = densidade aparente;

M_{seca} = massa seca;

V = volume exterior.

Foram feitos testes em 2 amostras de cada material em cada condição.

3.4.2 Porosidade aparente

Consiste na medição do volume de poros abertos que se comunicam com o exterior em relação ao volume total. Para este ensaio é necessário a medição da massa seca, a saturação do corpo de prova em água para obtenção da massa saturada e a massa imersa, que é medida através da imersão do corpo de prova saturado em um recipiente com água. Com base nestes valores temos:

$$PA = 100 \times \{ (M_{\text{saturada}} - M_{\text{seca}}) / (M_{\text{saturada}} - M_{\text{imersa}}) \}, \text{ onde:}$$

PA = porosidade aparente;

M_{saturada} = massa saturada;

M_{seca} = massa seca;

M_{imersa} = massa imersa.

Foram feitos testes em 2 amostras de cada material em cada condição.

3.4.3 Resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA)

O ensaio de resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) consiste em submeter corpos de prova refratários a um carregamento compressivo uniaxial crescente até a ruptura, utilizando uma prensa hidráulica ou máquina universal de ensaios. O método é estabelecido pela ABNT NBR 11222, que define os critérios de preparação, execução e interpretação dos resultados.

Os corpos de prova, previamente preparados (como recebidas e após exposição a 1400 °C por 1 hora em atmosfera redutora) e condicionados à temperatura ambiente, são posicionados entre placas metálicas paralelas, garantindo alinhamento adequado. A carga é aplicada de forma contínua e controlada, sem impactos, até que ocorra a fratura do material. A resistência é calculada pela razão entre a carga máxima suportada e a área da seção transversal do corpo de prova, fornecendo uma medida da integridade mecânica do refratário em condição a frio conforme equação a seguir:

$$RCTA = F_{Máximo} / A, \text{ onde:}$$

RCTA = resistência à compressão à temperatura ambiente;

$F_{Máxima}$ = carga máxima até a ruptura (N);

A = área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

Foram feitos testes em 2 amostras de cada material em cada condição e aplicado uma prensa manual da CONTENCO com capacidade de 24.000 kgf.

3.5 Teste de oxidação

Corpos de prova, no formato cilíndrico de 50x50 mm, dos materiais sob investigação foram dispostos em um forno a temperatura de 1000 °C por um período de 5 horas. Durante este tempo e com a passagem de ar no interior do forno foi avaliado a camada oxidada (descarbonetada) dos corpos de prova, obtendo-se assim o percentual de oxidação de cada material. Foram feitos testes em 2 amostras de cada material.

3.6 Teste de corrosão estático

Foram preparados corpos de provas dos materiais refratários conforme norma ABNT NBR 9641, onde foram feitos furos centrais nas amostras para deposição das escórias de processo. Estes corpos de provas com escória foram levados à temperatura de 1600 °C por um período de 1 hora. A Figura 22 ilustra as amostras posicionadas no forno antes e após o teste de corrosão.

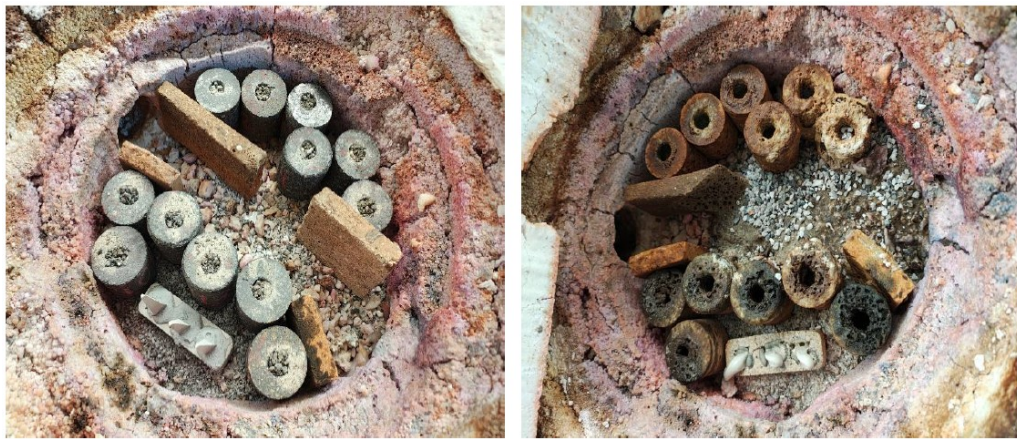


Figura 22 - Amostras inseridas no forno, antes e após o teste.

Após o teste, os corpos de provas foram resfriados naturalmente à temperatura ambiente e cortados ao meio para avaliação do desgaste corrosivo sofrido por eles. Foram feitos testes em 2 amostras de cada material.

3.7 Teste de corrosão dinâmico

Outros corpos de provas foram preparados para teste de corrosão dinâmico. Estes materiais refratários foram atacados quimicamente por dois tipos de escória utilizadas no processo de fabricação do aço na usina da ArcelorMittal Monlevade, sendo um teste com aplicação de escória ácida e outro com escória básica com adição de fluorita. A composição química destas escórias corresponde àquelas analisadas e apresentadas na Tabela 3 deste trabalho.

Os testes aconteceram com temperaturas de 1600 °C por um período de 1 hora e foram importantes para comparar a performance dos diferentes materiais expostos a uma mesma condição. Foram feitos testes em 2 amostras de cada material.

3.8 Análise da microestrutura

Com o intuito de verificar as características das matérias primas aplicadas na fabricação dos materiais refratários, estes passaram por uma análise de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X, sendo esta análise importante para identificar a qualidade dos grãos de MgO aplicados, a distribuição destes em termos de qualidade e tamanhos de cristais, a grafita empregada e a presença de elementos antioxidantes.

O ensaio de microscopia óptica foi realizado no Laboratório da Refralab. Foi realizada a seleção da área a ser analisada. Posteriormente houve o corte desta região com dimensões aproximadas de 20x20x20 mm. Desse modo, foi realizado o embutimento a frio da amostra com resina acrílica. Após a cura das amostras, foi feito o lixamento e polimento até obtenção de uma face adequada a ser observada no microscópio óptico. O equipamento utilizado para obtenção das imagens é da marca Zeiss, modelo Axio Scope A.1 com luz refletida.

As mesmas amostras utilizadas na microscopia óptica foram analisadas pelo MEV. As leituras foram realizadas no Laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC/MG). A microscopia eletrônica de varredura utilizou o equipamento da marca Jeol, modelo JSM IT300 e o mapeamento químico por EDS, foi utilizado o equipamento da marca Oxford, modelo NX5.

Os ensaios de difração de raios X (DRX) foram realizados no Laboratório da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando um difratômetro PHILIPS-PANALYTICAL PW 1710, com radiação Cu K α e operando a 40 kV e 30 mA. Os difratogramas foram obtidos à temperatura ambiente, na faixa de 10 a 90° (2 θ), utilizando passo de 0,06°. Análise semiquantitativa de fases foi realizada pelo método de Rietveld através do *software* High Score Plus.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados ensaios com os diferentes tipos de materiais refratários de MgO-C com aplicabilidade na linha de escória afim de conhecer as suas características e impacto destas na performance operacional.

4.1 Análise da microestrutura

Para avaliação da microestrutura e elementos presentes em cada material refratário foram realizados ensaios de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X.

4.1.1 Amostra T1

Observa-se pelas imagens de microscopia óptica e MEV apresentadas na Figura 23 a presença de grãos eletrofundidos de alta qualidade, com tamanhos de cristais de magnésia acima de 400 μm , matriz contendo apenas magnésia eletrofundida, com veios de grafita bem definidos. Nota-se ainda na imagem de MEV apresentada, a presença de fase secundária contendo Ca e Si entre dois cristais de magnésia, porém com baixos percentuais em toda a estrutura.

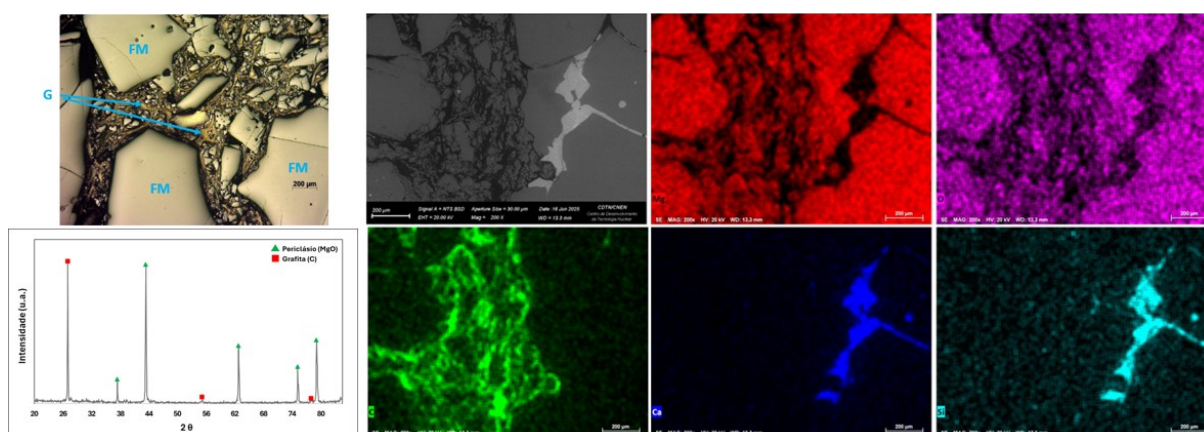


Figura 23 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T1, onde FM = magnésia eletrofundida e G = grafita.

Para confirmar as fases presentes em cada material refratário e complementar as análises de microscopia óptica e MEV, foi empregada a técnica de difração de raios X (DRX) nas amostras. Conforme difratogramas apresentado para a amostra T1 e que será apresentado também para as outras amostras, fica evidenciando a presença de periclásio (MgO), com picos principais localizados nos ângulos de 42°, 62° e 78° (2θ), e grafita (C), identificada pelo pico característico em 26° (2θ), confirmando a composição de MgO-C dos materiais empregados na fabricação dos tijolos refratários analisados.

4.1.2 Amostra T2

Para a amostra T2 (Figura 24) também é observado a presença de grãos eletrofundidos de alta qualidade, com tamanhos de cristais de magnésia acima de 400 μm , matriz contendo apenas magnésia eletrofundida, com veios de grafita bem definidos. Nota-se a presença de fase secundária contendo Ca e Si entre os cristais de magnésia, porém com baixos percentuais em toda a estrutura.

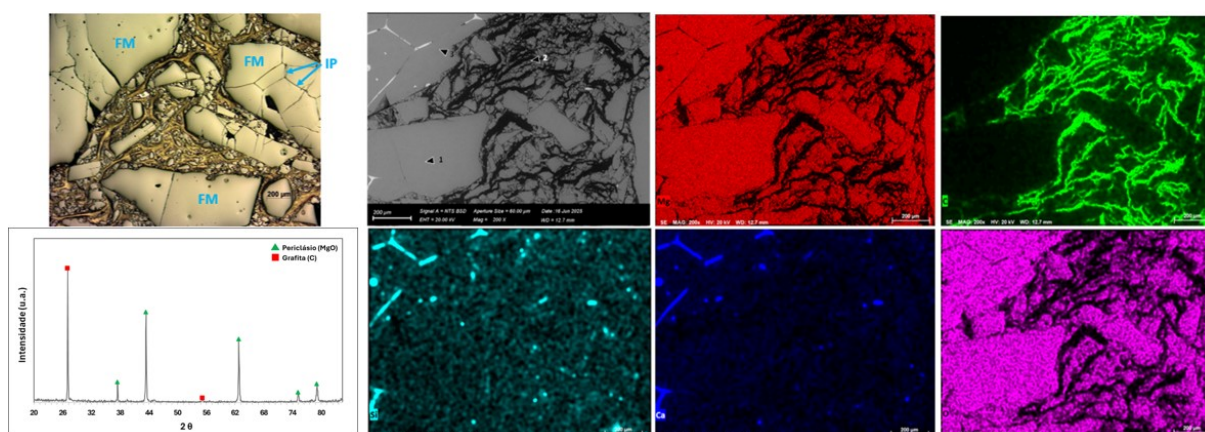


Figura 24 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T2, onde FM = magnésia eletrofundida e IP = impurezas nas fronteiras de cristais.

4.1.3 Amostra T3

Para a amostra T3 (Figura 25) foi observado pela microscopia óptica e eletrônica a presença de grãos eletrofundidos de baixa e alta qualidade. Nota-se na microscopia óptica que apesar de tamanho de grão de magnésia grande (maior que 800 μm), os tamanhos de cristais de magnésia são menores ou iguais a 200 μm com elevada presença de impurezas entre os cristais. Como pode ser observado pelo MEV, existe também na estrutura, magnésia eletrofundida de maiores cristais com menor teor de impurezas. Avaliando a amostra por completo prevalece na estrutura cristais menores. Foi observado ainda na amostra T3, a considerável presença de Si metálico na matriz de magnésia e grafita, o qual foi utilizado como elemento antioxidante.

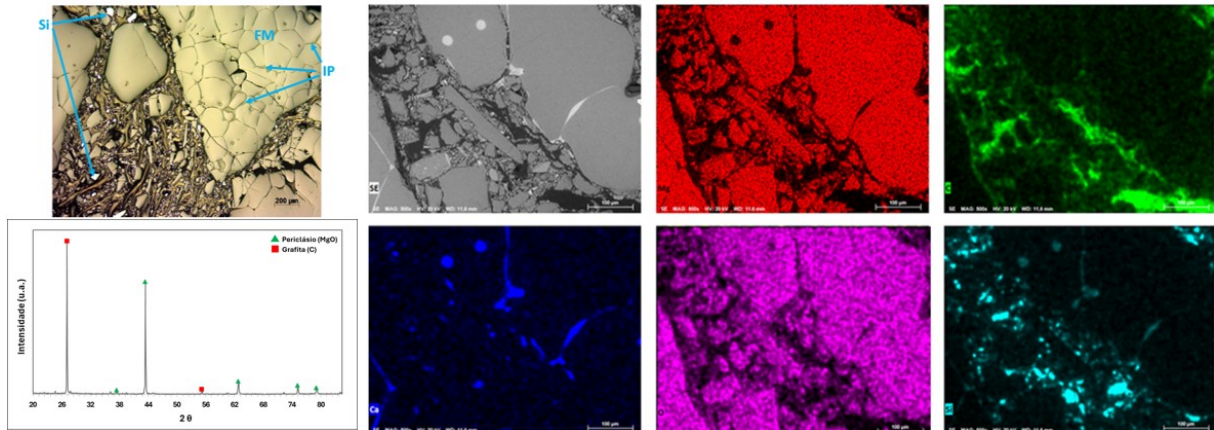


Figura 25 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T3, onde FM = magnésia eletrofundida, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e Si = silício metálico.

4.1.4 Amostra T4

Para a amostra T4 (Figura 26), observa-se pelas imagens apresentadas a presença de grãos de magnésia eletrofundida e sinterizada (identificada nos grãos principais de periclásio, como também na matriz). Nota-se a presença de fase secundária contendo Ca e Si em toda a estrutura, inclusive no interior do grão de magnésia sinterizada. Não foi observado presença de elemento metálico utilizado com antioxidante.

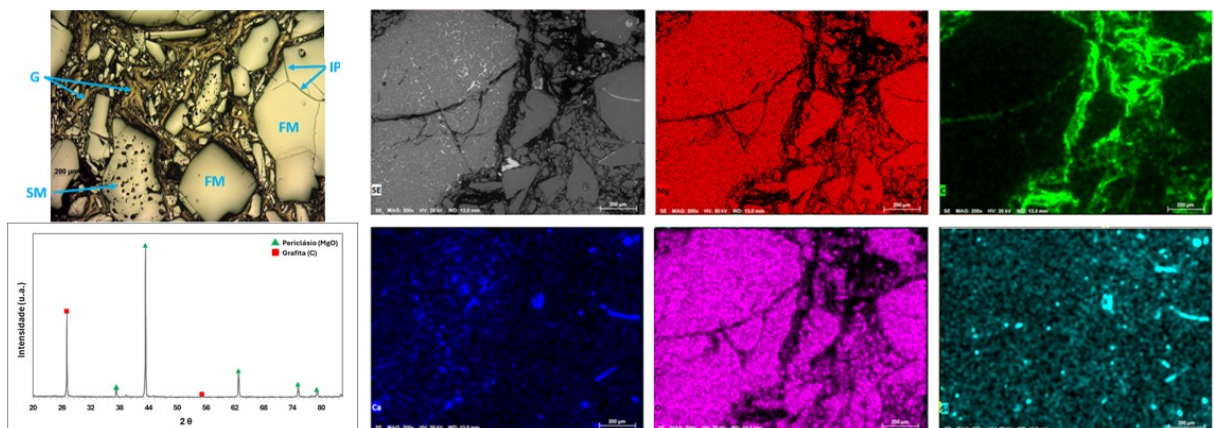


Figura 26 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T4, onde FM = magnésia eletrofundida, SM = sinter de magnésia, IP = impurezas nas fronteiras de cristais e G = grafita.

4.1.5 Amostra T5

Para a amostra T5 (Figura 27), observa-se pelas imagens apresentadas a presença de grãos eletrofundidos de alta qualidade, com tamanhos de cristais de magnésia acima de $400\ \mu\text{m}$, matriz contendo apenas magnésia eletrofundida, com veios de grafita bem definidos. Nota-se

ainda na imagem de MEV a presença de Si metálico na matriz de magnésia e grafita, o qual foi utilizado como elemento antioxidante. Comparado a amostra T3, o percentual de Si metálico se apresenta em menores proporções.

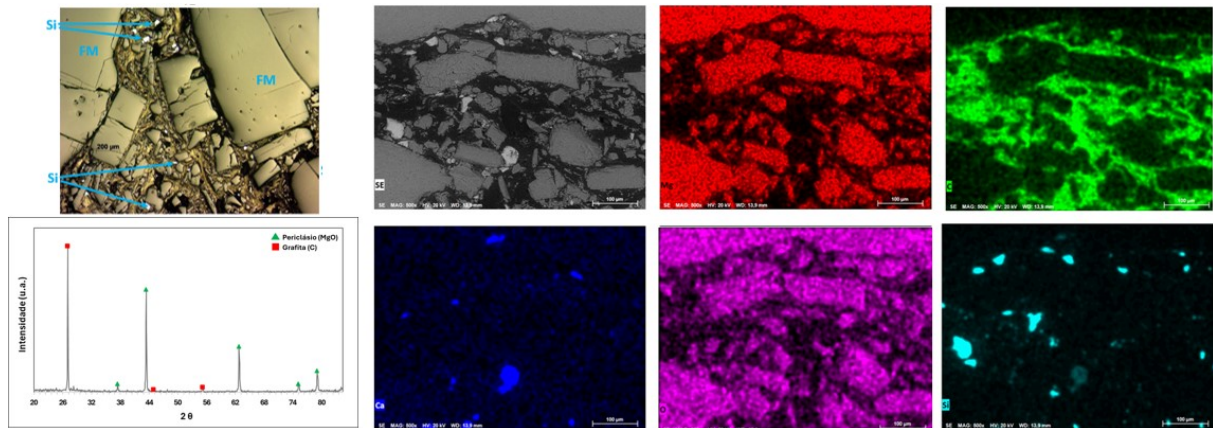


Figura 27 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T5, onde FM = magnésia eletrofundida e Si = silício metálico.

4.1.6 Amostra T6

Para a amostra T6 (Figura 28) foi observado pela microscopia óptica e eletrônica a presença de grãos de magnésia eletrofundida e sinterizada, sendo esta última, em maior proporção na amostra T6 comparado aos demais materiais. A magnésia sinterizada foi identificada nos grãos principais de periclásio, como também na matriz. Nota-se a presença de fase secundária contendo Ca e Si entre os cristais de magnésia. Não foi observado presença de elemento metálico utilizado com antioxidante.

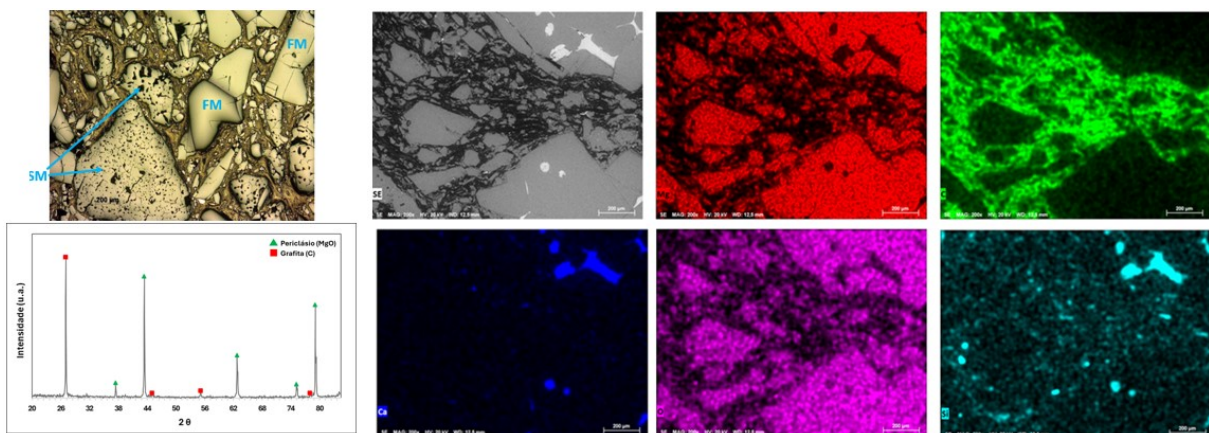


Figura 28 - Microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com mapeamento químico por EDS e difração de raios X da amostra T6, onde FM = magnésia eletrofundida e SM = sínter de magnésia.

Com base nos resultados apresentados, foi observado que os materiais T1, T2 e T5 apresentaram

apenas grãos de magnésia eletrofundida. Os materiais T4 e T6 apresentaram em sua estrutura grãos de magnésia sinterizada, com a presença desta nos grãos de periclásio e na matriz, sendo que a amostra do material T6 mostrou maior proporção de magnésia sinterizada. Para os materiais T3 e T5 foi observada a presença de Si metálico como antioxidante, em maior proporção no material T3.

4.2 Densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica

A Tabela 4 apresenta os valores de densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica dos materiais avaliados. Essas propriedades foram determinadas tanto nas amostras como recebidas quanto após tratamento térmico a 1400 °C por uma hora sob atmosfera redutora.

Tabela 4 - Resultados de densidade aparente, porosidade aparente e resistência mecânica.

	Amostra	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Como recebida (refratários não usados)	Densidade aparente, g/cm ³	3,12±0,01	3,15±0,01	3,03±0,04	3,08±0,05	3,04±0,01	3,13±0,01
	Porosidade aparente (%)	2,7±0,4	2,1±0,1	1,8±0,3	1,3±0,7	3,3±0,1	1,1±0,3
	RCTA, MPa	31,1±5,3	39,7±7,2	33,9±4,6	35,3±3,2	45,24±2,2	32,5±7,8
Após tratamento térmico a 1400 °C	Densidade aparente, g/cm ³	2,97±0,04	3,06±0,01	2,93±0,01	2,89±0,06	2,97±0,00	3,02±0,01
	Porosidade aparente (%)	8,7±0,6	7,4±0,6	7,8±0,3	8,6±0,6	7,3±0,0	6,6±1,2
	RCTA, MPa	11,2±1,2	16,0±4,4	19,3±6,6	17,9±2,8	19,0±4,7	12,3±2,0

Observa-se que os resultados de densidade aparente apresentam baixa dispersão tanto no material não utilizado quanto após o tratamento térmico. Entretanto, os valores de porosidade mostram variações mais significativas, tanto nas amostras como recebidas quanto após o tratamento. Considerando a condição pós-tratamento, que representa de forma mais fiel o estado real do material, foi observada uma diferença de até 20% nos resultados de porosidade.

Refratários de magnésia-carbono (MgO-C) tendem a perder resistência mecânica e densidade aparente após o tratamento térmico, pois o carbono presente na matriz se oxida em altas temperaturas, gerando aumento de porosidade, formação de microtrincas e redução da coesão entre os grãos de MgO. Esse processo remove parte do carbono que anteriormente contribuía para a integridade estrutural do material, resultando em uma microestrutura mais porosa e com menor robustez mecânica.

Outro fator contribuinte é a presença de impurezas como CaO e SiO₂ nos agregados de magnésia, que tendem a se concentrar nas fronteiras de cristais e formar fases de baixo ponto de fusão, as quais se tornam líquidas durante o aquecimento. Essa fase líquida intensifica a formação de vazios e, conseqüentemente, aumenta a porosidade, levando à redução tanto da densidade aparente quanto da resistência mecânica do refratário.

As amostras T4, T6 e T3 apresentaram o maior incremento de porosidade ao se comparar a condição como recebida com a condição tratada termicamente. Esse comportamento está provavelmente associado aos fatores previamente discutidos — oxidação do carbono e maior teor de impurezas — conforme observado nas microestruturas, com identificação de grãos sinterizados (amostras T4 e T6) e cristais menores de magnésia eletrofundida contendo maior presença de impurezas ao longo das fronteiras de grão (amostra T3).

4.3 Resistência à oxidação

Na Figura 29 são apresentados os resultados para o teste de oxidação de cada um dos materiais. Os testes foram realizados com temperatura de 1000 °C por um período de 5 horas.

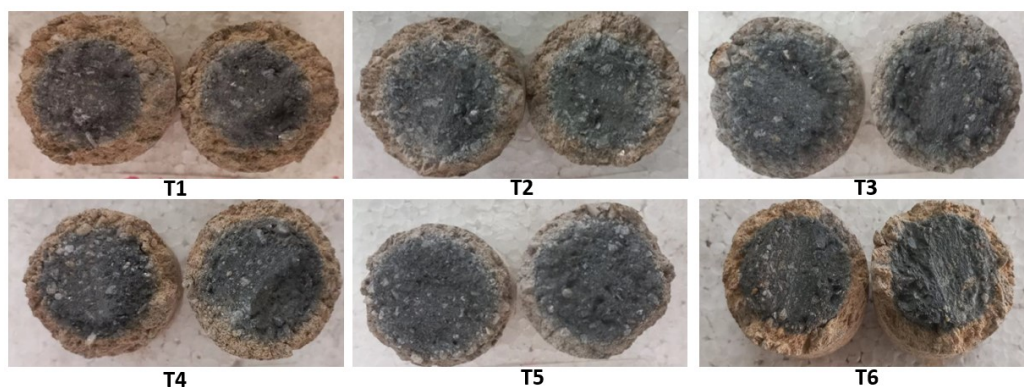


Figura 29 - Amostras após o teste de oxidação

O resultado de oxidação é baseado no cálculo da área inicial da superfície da amostra menos a área não descarbonetada da amostra final. A diferença entre estes valores é dividida pela área inicial, resultando assim no percentual de oxidação de cada um dos materiais.

O Figura 30 mostra que os materiais T5 e T3 tiveram a menor taxa de oxidação, resultado da presença do Si metálico como antioxidante. Os demais materiais se apresentam com maior taxa de oxidação, sendo que os materiais T1 e T2, com maior porosidade aparente (amostras in natura), apresentaram maior oxidação, entretanto os valores observados são aceitáveis para materiais sem a presença de antioxidantes.

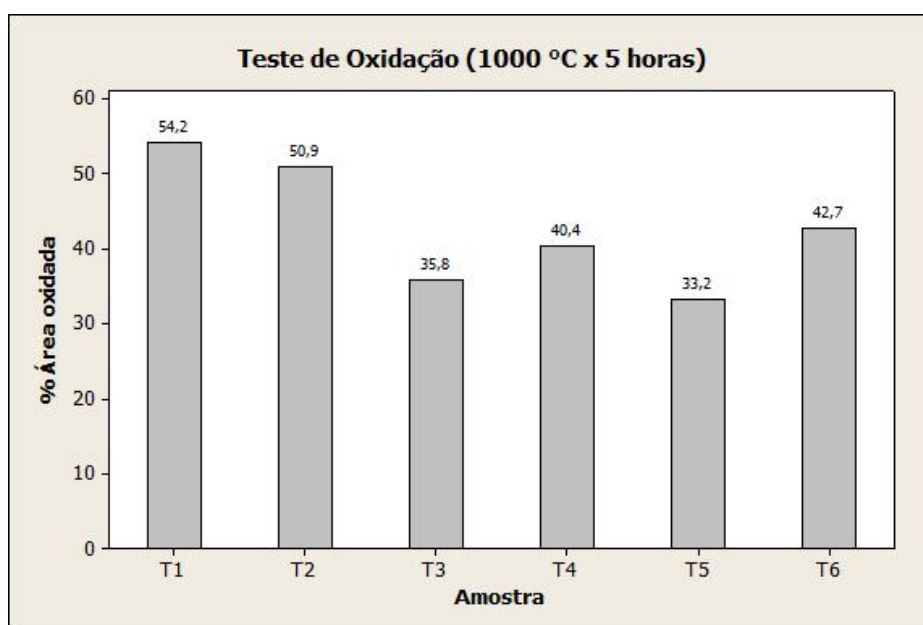


Figura 30 - Resultado do teste de resistência à oxidação.

4.4 Teste de corrosão estático

Estes testes foram realizados a uma temperatura de 1600 °C por um período de 1 hora. A Figura 31 apresenta as amostras após realização dos testes de corrosão estática.

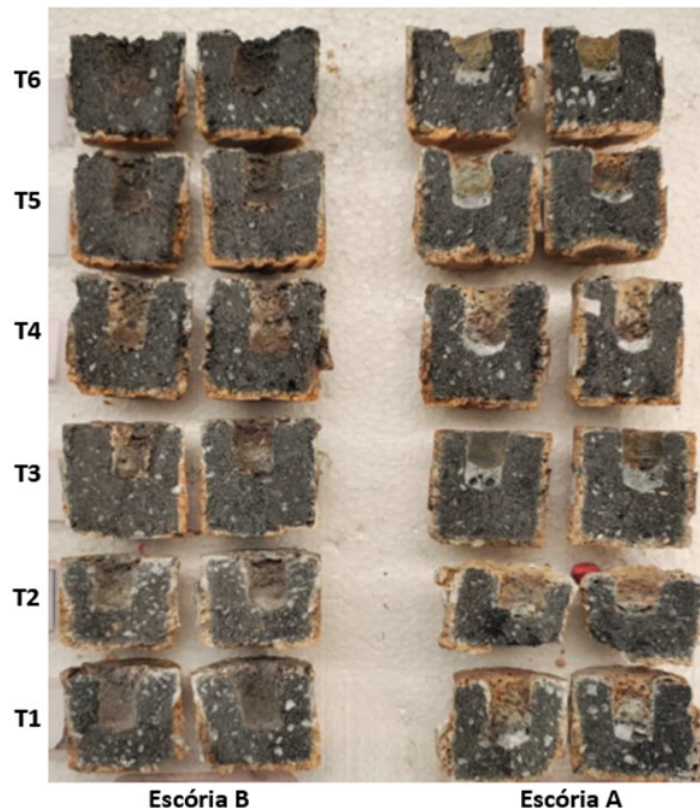


Figura 31 - Amostras após o teste de corrosão estático.

O resultado do desgaste no teste de corrosão estático é mostrado na Figura 32.

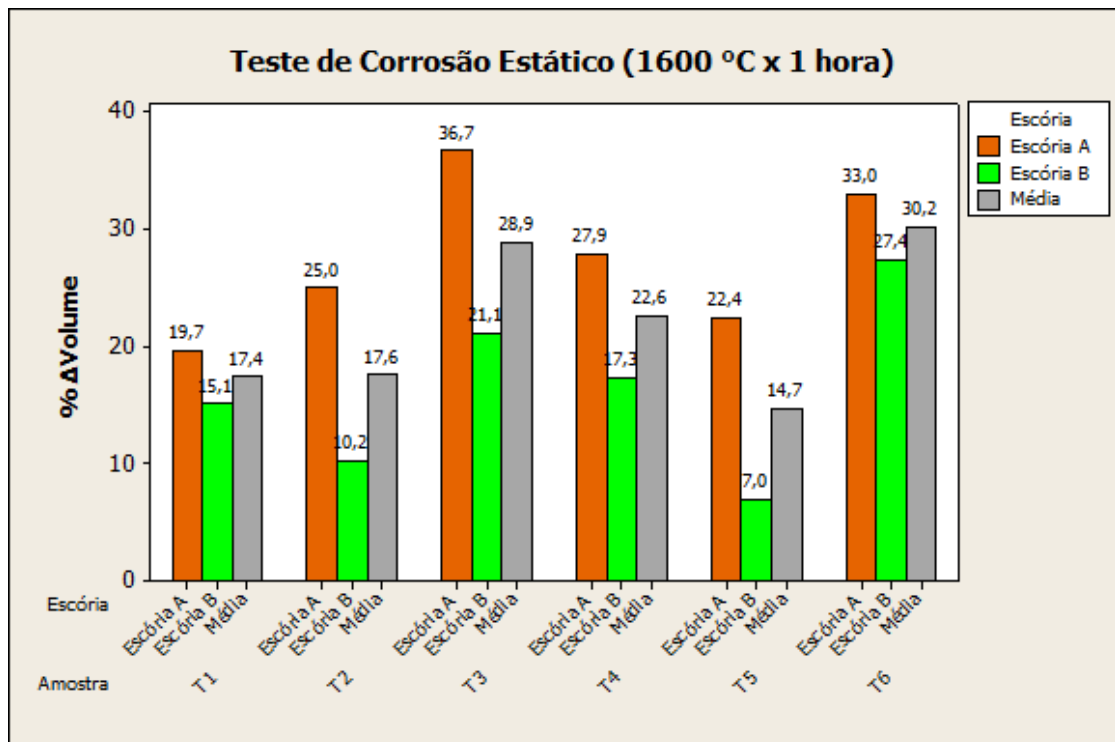


Figura 32 - Resultado do teste de corrosão estático.

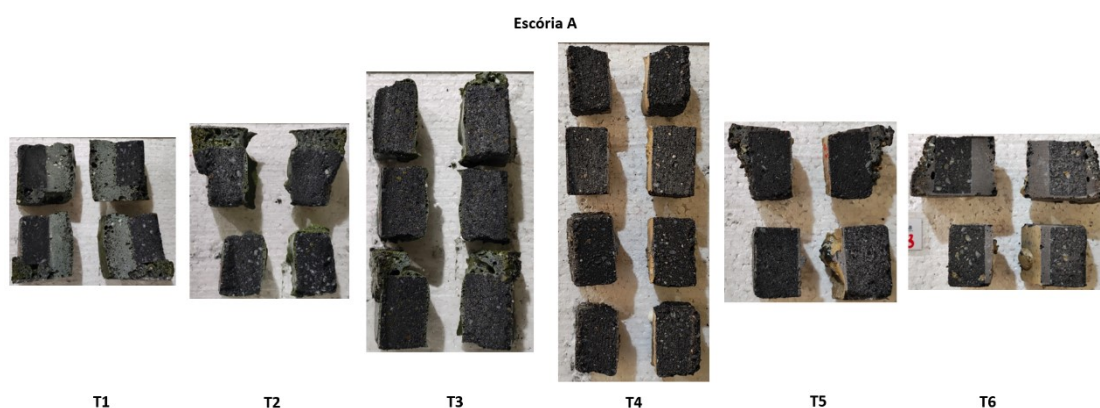
O material T5 apresentou a maior resistência ao ataque de escória (média dos resultados do ensaio), seguido pelos materiais T1 e T2. Esse resultado está correlacionado com a microestrutura observada nesses materiais, composta exclusivamente por grãos de magnésia eletrofundida com maiores tamanhos de cristais de periclásio. Já os materiais contendo magnésia sinterizada e predominantemente menores tamanhos de cristal apresentaram maior percentual de desgaste.

Os ensaios de corrosão estática indicaram que a escória ácida promoveu maior desgaste dos refratários. Conforme previamente discutido, o nível de saturação de MgO sob condições de baixa basicidade tende a ser mais elevado quando comparado ao efeito isolado do teor de CaF_2 ; por essa razão, o desgaste químico foi mais pronunciado.

Entretanto, a literatura destaca que altos teores de fluorita contribuem de forma significativa para a degradação dos refratários, em função do aumento da molhabilidade da escória, da remoção da barreira de carbono e do ataque químico ao MgO, com conseqüente formação de MgF_2 . Esse efeito pode ser avaliado com maior precisão por meio de ensaios de corrosão dinâmica ou pela realização de testes de ataque de escória em forno de indução.

4.5 Teste de corrosão dinâmico

Estes testes foram realizados a uma temperatura de 1600 °C por um período de 1 hora. A Figura 33a e 33b apresenta as amostras após realização dos testes de corrosão dinâmico.



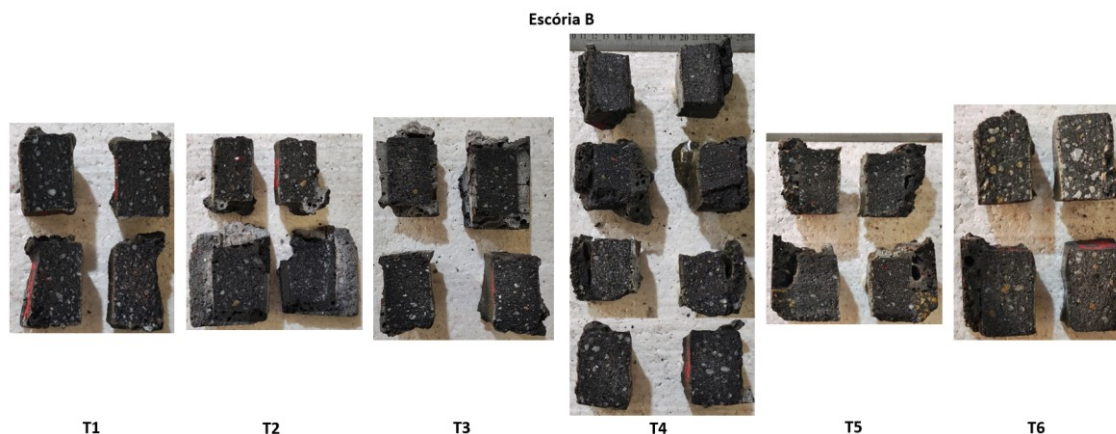


Figura 33 - a) Amostras após o teste de corrosão dinâmico com a escória A; b) amostras após o teste de corrosão dinâmico com a escória B.

Conforme mostrado na Figura 33a e 33b, os ensaios de corrosão dinâmica realizados neste trabalho apresentaram valores de desgaste extremamente baixos, dificultando sua quantificação com precisão. Em razão dessa limitação, os resultados não foram considerados representativos para comparação entre os diferentes materiais ou para aprofundar a discussão sobre o comportamento das escórias A e B. É possível que o tempo de exposição do material à escória tenha sido insuficiente para provocar desgaste mensurável. Além disso, o número reduzido de amostras disponíveis impossibilitou a realização de novos ensaios que pudessem confirmar essa hipótese.

Um outro teste possível de corrosão que poderia ser aplicado simulando uma condição mais próxima da realidade de operação, seria o teste de corrosão em forno de indução. Devido prazo para apresentação final deste projeto e a disponibilidade deste tipo de equipamento, fica como sugestão estes testes para trabalhos futuros.

5 – CONCLUSÕES

Os ensaios realizados permitiram uma avaliação abrangente das propriedades microestruturais, físicas e de desempenho dos materiais refratários de MgO-C aplicáveis à linha de escória. A caracterização por microscopia óptica e eletrônica evidenciou diferenças significativas entre os materiais, especialmente quanto ao uso de magnésia eletrofundida ou sinterizada, bem como à distribuição de impurezas e aditivos antioxidantes.

Apesar de as fichas técnicas indicarem que todos os materiais eram constituídos exclusivamente

por magnésia eletrofundida, a análise microestrutural revelou a presença de grãos sinterizados nos materiais T4 e T6. Esse resultado reforça a importância de trabalhos de caracterização microestrutural para validar informações fornecidas e compreender corretamente o desempenho prático dos refratários.

A presença de Si metálico como antioxidante nos materiais T3 e T5 contribuiu para a redução da taxa de oxidação observada. Os materiais T1, T2 e T5, compostos unicamente por magnésia eletrofundida de alta qualidade, apresentaram melhor desempenho global, com menor evolução da porosidade e menor perda de densidade aparente após tratamento térmico, além de maior resistência à corrosão por escória. Em contraste, os materiais T4 e T6, contendo magnésia sinterizada, e o material T3, com cristais menores e maior teor de impurezas como CaO e SiO₂, exibiram maior evolução da porosidade, maior degradação por oxidação e maior desgaste por escória, evidenciando menor estabilidade química.

Os testes de corrosão estática demonstraram que a escória ácida promove maior desgaste dos refratários, sendo o material T5 o mais resistente, seguido por T1 e T2. Esses resultados confirmam a influência determinante da pureza da magnésia, do tamanho de cristal e da integridade microestrutural na durabilidade e no desempenho sob escória.

Embora o teste de corrosão dinâmico tenha apresentado desgaste pouco mensurável, limitando sua aplicação como ferramenta comparativa, os dados obtidos nos demais ensaios fornecem subsídios relevantes para a seleção de refratários mais adequados às condições operacionais da linha de escória. Os resultados também indicam a necessidade de controle rigoroso da microestrutura e das impurezas nos agregados de magnésia, bem como do uso adequado de antioxidantes, para maximizar a vida útil dos materiais em serviço.

5.1 Contribuições do trabalho

Os materiais selecionados para este estudo correspondem a produtos utilizados rotineiramente e a materiais fornecidos por empresas em fase de desenvolvimento na usina de Monlevade. Este trabalho proporcionou uma oportunidade de comparar os resultados práticos obtidos na operação dos equipamentos com a aplicação desses materiais aos resultados obtidos em ensaios laboratoriais.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de testes de corrosão em forno de indução, com o objetivo de simular de forma mais fiel as condições reais de operação industrial.

Outra linha de pesquisa que pode ser desenvolvida está relacionada ao estudo da fluidez das escórias utilizadas no processo. Observou-se que, embora a escória ácida tenha provocado maior desgaste nos refratários em comparação à escória B, esta última apresenta um elevado teor de fluorita (CaF_2), elemento diretamente associado à capacidade da escória de reter inclusões. Por outro lado, esse mesmo componente favorece a penetração da escória no refratário, intensificando seu desgaste.

Um estudo futuro poderia avaliar a fração líquida da escória em função da variação do percentual de fluorita, buscando manter sua capacidade de retenção de inclusões e, simultaneamente, analisar o impacto dessas alterações no desgaste dos refratários.

Ainda complementar a este trabalho, sugere-se que sejam realizadas análises microscópicas das amostras após os ensaios de ataque por escória, como objetivo de identificar as microestruturas obtidas.

REFERÊNCIAS

- AKKURT, S.; LEIGH, H. D. **Corrosion of MgO-C ladle refractories**. *Bulletin of the American Ceramic Society*, v. 82, n. 6, p. 39–45, 2003.
- ANAN, K. **Wear of Refractories in Basic Oxygen Furnace (BOF)**. *Journal of the Technical Association of Refractories*, v. 21, n. 4, p. 241-246, 2001.
- ARAÚJO, L. A. de. *Manual de siderurgia: Produção*. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2005. 470 p.
- BORGES, R. A. A.; SILVA, G. F. B. L. e. **A statistical and post-mortem study of wear and performance of MgO-C resin bonded refractories used on the slag line ladle of a basic oxygen steelmaking plant**. *Engineering Failure Analysis*, v. 78, p. 161–168, 2017. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.03.020.
- BRAGANÇA, S. R. **Aspectos teóricos e práticos sobre a corrosão de refratários utilizados na metalurgia**. In: *54º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2010, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: ABCeram, 2010. p. 1142–1151.
- BRAGANÇA, S. R. **Corrosão de refratários utilizados na siderurgia**. Parte II: propriedades físicas dos refratários e fatores operacionais. *Cerâmica*, v. 58, n. 348, p. 459–464, 2012. DOI: 10.1590/S0366-69132012000400007.
- CHAVES, A. J. M. *Avaliação do desempenho operacional de um convertedor LD através do desenvolvimento do processo de sopro com lança de quatro furos*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- COSTA, H. J.; RIBEIRO, E. M. *Curso Academia de Siderurgia da ArcelorMittal Monlevade*. João Monlevade, MG, 2016. Documento interno.

DUARTE, A. **Classificação de Refratários**. In: *Curso Fundamentos de Refratários*, Belo Horizonte, 2012.

DUARTE, A. K. **Mecanismos de desgaste e propriedades dos refratários**. In: *Curso de Refratários para Siderurgia*. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2005. Material técnico.

DUARTE, A. K.; FIGUEIREDO JUNIOR, A. O. **Introdução a Refratários / Propriedades dos Materiais Refratários / Mecanismos de Desgaste**. Curso da ABM, 2023. Material didático interno.

ELECTRICAL E-LIBRARY. **Grafita**. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2019/06/07/grafita/>. Acesso em: 05 mar. 2025.

FREIRE, M. V. et al. **Um enfoque termodinâmico para o estudo do comportamento de refratários MgO-C na linha de escória de panelas para aço líquido**. In: *47º Seminário de Aciaria – Internacional*, 2016, Rio de Janeiro. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2016.

GOKCE, A. S.; GURCAN, C.; OZGEN, S.; AYDIN, S. **The effect of antioxidants on the oxidation behaviour of magnesia-carbon refractory bricks**. *Ceramics International*, v. 34, p. 323–330, 2008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2006.10.004.

HOCQUET, F. **Oxidation behavior of carbon-containing refractories: comparative tests and performance evaluation**. *Refractories Applications and News*, v. 12, n. 3, p. 22–28, 2007.

HUNOLD, K.; PÖTSCHKE, J.; THIESEN, M. **Effect of boron-containing antioxidants on the reaction between MgO-C bricks, molten steel and slag**. In: *Unified International Technical Conference on Refractories – UNITECR*, 1999, Berlin. Proceedings [...]. Berlin: UNITECR, 1999. p. 316–319.

JANSEN, H. W.; DALDRUP, H. G. **Refractories in steel ladles — materials and design**. *AISTech Conference Proceedings*, v. 1, p. 1–10, 2004.

KUJUR, M. K. et al. **Raw materials for manufacturing of superior quality MgO-C bricks.** *Materials Today: Proceedings*, v. 5, p. 2359–2366, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.09.242.

KUNDU, R.; SARKAR, R. **MgO-C Refractories:** a detailed review of these irreplaceable refractories in steelmaking. *Interceram – International Ceramic Review*, v. 70, p. 46–55, 2021. DOI: 10.1007/s42411-021-0457-9.

LANDY, R. A. **Magnesia Refractories.** In: SCHACHT, C. A. (ed.). *Refractories Handbook*. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 323–356.

LEITE, F. C.; LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. **Características e mecanismos de desgaste dos refratários MgO-C usados na linha de escória de painéis de aço.** *Cerâmica*, v. 58, n. 347, p. 459–464, 2012. DOI: 10.1590/S0366-69132012000300002.

LEITE, F. C.; LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. **Características e mecanismos de desgaste dos refratários MgO-C usados na linha de escória de painéis de aço.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2014. Relatório técnico.

LI, J. et al. **Comparative life cycle assessment of conventional and new fused magnesia production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 91, p. 170–179, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.043.

LI, X.; RIGAUD, M.; PALCO, S. **Oxidation kinetics of graphite phase in magnesia-carbon refractories.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 78, p. 965–971, 1995. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1995.tb08423.x.

LUZ, A. P. et al. **In situ hot elastic modulus evolution of MgO-C refractories containing Al, Si or Al-Mg antioxidants.** *Ceramics International*, v. 42, p. 9836–9843, 2016. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.03.080.

MATTILA, R. A.; VATANEN, J. P.; HARKKI, J. J. **Chemical wearing mechanism of refractory materials.** *Metallurgy*, v. 31, p. 241–245, 2002.

NASCIMENTO, L. B.; CINTRA, C. L. **Utilização de testes de recebimento e acompanhamento como ferramentas de controle de qualidade do revestimento refratário aplicado em calcinadores: um estudo de caso.** *Revista Científica Semana Acadêmica*, v. 10, n. 223, p. 1–69, 2022.

QUINTELA, M. A. et al. **A novel methodology for evaluating the oxidation resistance of carbon-containing refractories.** *Refractories Applications and News*, v. 7, n. 1, p. 16–19, 2002.

REFRATECHNIK STEEL GMBH. **Proposta Técnica para ArcelorMittal Monlevade.** Versão 1.2. Autores: Allan Alipio Costa; Cristobal Feliciano-Bruzual; Luis Souza. Novembro 2023. Documento interno.

SANTOS, A. V. et al. **O incrível mundo dos materiais porosos – características, propriedades e aplicações.** *Química e Sociedade*, v. 38, n. 1, p. 2–9, 2016. DOI: 10.5935/0104-8899.20160002.

SARKAR, R. **Refractory Technology.** Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/9781315368054.

SEMINÁRIOS ALAFAR. **Curso: Fundamentos em Refratários – Alamar Kasan Duarte.** Santiago do Chile, outubro de 2015. Material de curso.

ZHANG, P.; SEETHARAMAN, S. **Dissolution of MgO in CaO–“FeO”–CaF₂–SiO₂ slags under static conditions.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 77, n. 4, p. 970–976, 1994.

ZHANG, S.; LEE, W. E. **Use of phase diagrams in studies of refractories corrosion.** *International Materials Reviews*, v. 45, n. 2, p. 41–58, 2000.

ZHU, T. et al. **A new approach to fabricate MgO-C refractories with high thermal shock resistance by adding artificial graphite.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 38, p. 2179–2185, 2018. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.018.