

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)**

JAKSON MATTIELLO

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO
OPERACIONAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES REFRAATÓRIOS UTILIZADOS
EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO**

Porto Alegre

2016

JAKSON MATTIELLO

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO
OPERACIONAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES REFROTÁRIOS UTILIZADOS
EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança

Porto Alegre

2016

JAKSON MATTIELLO

**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO
OPERACIONAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES REFRAATÓRIOS UTILIZADOS
EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, em área de concentração de Ciência e Tecnologia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança

Aprovado em: ____ / ____ / _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Melo – UFRGS _____

Prof. Dr. Wagner Vianna – UFRGS _____

Dr. Ricardo T. da Cruz – IFRGS _____

Porto Alegre

2016

A minha família
que sempre me apoiou e deu força.
Ao meu orientador pelo incentivo e ajuda
em todos os momentos dedicados a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha família por sempre acreditar na minha capacidade e me incentivar a estudar.

A minha namorada Márcia pelo incentivo e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Saulo Roca Bragança, pela orientação, amizade e pelo grande apoio durante o período de execução deste trabalho, expresso a minha profunda gratidão.

À Gerdau Riograndense, em especial aos Eng. Tiago Alliatti Beleza e Sandro Luiz Zahner por possibilitarem a realização deste trabalho.

Ao Dr. Ricardo Thomé da Cruz e ao Eng. Rafael Sonaglio por toda a ajuda durante a realização do trabalho.

Aos amigos Márcio Samuel Fernandes Maurer, Alexandro Oliveira e Rafael Santiago pelo apoio na execução do trabalho.

RESUMO

O setor siderúrgico, assim como os demais setores da indústria, vem buscando alternativas para a redução dos custos de produção e aumento de produtividade. Em aciarias elétricas, os principais custos de produção do aço podem ser divididos, de forma simplificada, entre o custo dos insumos e o custo das matérias primas. Os refratários estão entre os cinco maiores custos na produção do aço em usinas semi-integradas. Entretanto, o conhecimento detalhado da microestrutura e do comportamento desses materiais ainda é bastante restrito aos seus fabricantes. Tendo em vista a importância dos refratários na produção do aço, este trabalho teve como objetivo gerar conhecimento acerca de sua microestrutura e comportamento em operação, com foco na diminuição do consumo e maximização dos lucros da empresa. Para tal, com o intuito de conhecer detalhadamente sua microestrutura e prever seu desempenho, foram realizadas análises de caracterização em laboratório e testes que simularam as condições de operação. Após os testes laboratoriais, os materiais selecionados foram testados em operação em forno elétrico a arco, buscando encontrar o melhor conjunto de materiais sob o ponto de vista de estabilidade do processo e custo de refratários. O cenário que apresentou melhores resultados em relação à performance e ao consumo específico foi a configuração A, onde foram utilizados os tijolos A, massa de soleira X, massa de reparo K e canal EBT P. Além disso, a substituição do tijolo C pelo tijolo A gerou uma redução de custo de 40%, e o conhecimento gerado com a caracterização do canal EBT proporcionou uma redução de 29,9% no preço desse item.

Palavras-chave: refratários; aciaria; forno elétrico a arco.

ABSTRACT

The steel industry, like other sectors of the industry, is seeking alternatives to reduce production costs and increase productivity. In electric steelworks, the main steel production costs can be divided, in a simplified way, between the cost of inputs and the cost of raw materials. Refractories are among the five largest costs in steel production in semi-integrated mills (mini-mills). However, detailed knowledge of the microstructure and behavior of these materials is still quite restricted to their manufacturers. Given the importance of the refractories in the production of steel, this study aimed to generate knowledge about their microstructure and behavior in operation, focusing on the reduction of consumption and maximization of profits. For that, in order to know in detail the microstructure and predict its performance, characterization analyzes and tests simulating the operating conditions were performed in the laboratory. After laboratory tests, the selected materials have been tested in operation in electric arc furnace, seeking to find the best set of materials from the point of view of stability of the process, and cost of refractories. The scenario that best results presented, in terms of performance and the specific consumption, was Configuration A, where bricks A, ramming mix X, repair mix K and EBT P were used. Moreover, the replacement of Brick B by brick A, generated a cost reduction of 40%, and the information gathered with the characterization of EBT, reduced the price of that item by 29.9%.

Keywords: refractories; steelmaking; electric arc furnace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais linhas de produção do aço.....	18
Figura 2 – Fluxo de produção típico de uma aciaria de aços carbono.....	19
Figura 3 – Forno Elétrico a Arco (FEA).....	22
Figura 4 – Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense.....	23
Figura 5 – Jato supersônico convencional e jato supersônico coerente.....	23
Figura 6 – Modelo convencional e EBT.....	24
Figura 7 – Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC.....	25
Figura 8 – Esquema de solidificação de aço no molde.....	26
Figura 9 – Estimativa de consumo de refratários por indústria.....	27
Figura 10 – Consumo de materiais refratários no mundo.....	28
Figura 11 – Construção Forno Elétrico a Arco.....	29
Figura 12 – Forno elétrico a arco em corte e detalhe do conjunto EBT.....	30
Figura 13 – Efeito do tratamento térmico sobre a tendência a hidratação, tamanho de grão e densidade de compostos de magnésia levemente calcinada.....	33
Figura 14 – Representação das Energias Interfaciais (γ_{SL} - Sólido - Líquido, γ_{LV} - Líquido - Vapor, γ_{SV} - Sólido - Vapor) e Ângulo de Contato.....	34
Figura 15 – Esquema geral do mecanismo de corrosão de refratários óxido-carbono.....	37
Figura 16 – Diagrama esquemático da penetração de escória líquida em refratário.....	38
Figura 17 – Diagrama simplificado de fase CaO – MgO.....	42
Figura 18 – Diagrama de fase CaO - SiO ₂	43
Figura 19 – Diagrama de fases MgO - SiO ₂	44
Figura 20 – Corte isotérmico a 1600°C no diagrama CaO - SiO ₂ – MgO.....	45
Figura 21 – Sistemas CaO - FeO e CaO - F ₂ O ₃	46
Figura 22 – Sistemas MgO - FeO e MgO - F ₂ O ₃	47
Figura 23 – Efeito do MgO sobre as isotermas de solubilidade a 1600°C no sistema CaO - MgO - FeO - SiO ₂ em contato com ferro metálico.....	48
Figura 24 – Vista em corte da montagem dos tijolos de segurança do forno.....	49

Figura 25 – Vista superior da montagem dos tijolos de trabalho do forno elétrico a arco.....	50
Figura 26 – Montagem dos tijolos do forno elétrico a arco.....	50
Figura 27 – Imagem da porta de escória do forno.....	51
Figura 28 - Vista em corte da montagem do bloco da porta de escória do FEA....	51
Figura 29 – Formas para acomodação da massa na carcaça do forno.....	52
Figura 30 – Detalhe da montagem do canal EBT e corte d região de vazamento do forno.....	53
Figura 31 - Amostras de massas refratárias de socagem (A, B, C).....	55
Figura 32 - Amostras de massas de reparo a quente (D, E).....	55
Figura 33 – Luva refratária do canal EBT.....	56
Figura 34 – Materiais refratários utilizados no forno - Configuração A.....	60
Figura 35 – Materiais refratários utilizados no forno - Configuração B.....	60
Figura 36 – Esquema de realização do teste.....	60
Figura 37 – Diminuição do percentual do FeO ao longo dos anos.....	62
Figura 38 – Consumo de massa de reparo a quente.....	63
Figura 39 – Variação no percentual de Mgo da escória.....	63
Figura 40 – Imagem em lupa eletrônica tijolos MgO-C das amostras A, B e C.....	64
Figura 41 – Microestrutruura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo A).....	65
Figura 42 – Microestrutruura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo B).....	66
Figura 43 – Microestrutruura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo C).....	66
Figura 44 – Composição química via EDS (Tijolo B).....	67
Figura 45 – Composição química via EDS (Tijolo A).....	68
Figura 46 – Composição química via EDS (Tijolo C).....	68
Figura 47 – Difratoograma (Tijolo A).....	70
Figura 48 – Difratoograma (Tijolo C).....	70
Figura 49 – Difratoograma (Tijolo B).....	71
Figura 50 – Curvas da análise termogravimétrica (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG) das amostras de tijolos A, B e C com as transformações ocorridas durante a análise.....	72
Figura 51 – FTIR com a identificação dos picos principais (Tijolos A, B e C).....	73
Figura 52 – Comparação da distribuição granulométrica das massas refratárias de reparo.....	75
Figura 53 – Comparação da distribuição granulométrica das massas refratárias	

de socagem.....	76
Figura 54 – Análise comparativa - Massas de reparo (K e J) – Técnica de difração de raios X.....	77
Figura 55 – Análise comparativa - Massas de socagem (X, Y e Z) – Técnica de difração de raios X.....	77
Figura 56 – Fração fina (passante # 48) das massas refratárias sinterizadas a 1400°C.....	78
Figura 57 – Difração de raios-X (Luva P).....	80
Figura 58 – Aspecto Geral (Luva P).....	81
Figura 59 – Análise química via microsonda (Luva P) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 5.....	81
Figura 60 – Análise química via microsonda (Luva P) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 6.....	83
Figura 61 – Difração de raios-X (Luva Q).....	84
Figura 62 – Análise química via microsonda (Luva Q) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 7.....	85
Figura 63 – Difração de raios- X (Luva R).....	86
Figura 64 – Análise química via microsonda (Luva R) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 8.....	87
Figura 65 – Luvas P, Q e R (após o uso).....	88
Figura 66 – Consumo específico de refratários do FEA - Configuração A.....	89
Figura 67 – Consumo específico de refratários do FEA - Configuração B.....	90
Figura 68 – Consumo de refratários por região do FEA.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Refratários Utilizados por Região e Sub-região do Forno.....	30
Tabela 2 – Composição química das massas refratárias.....	74
Tabela 3 – Retração dos corpos de prova sinterizados a 1400°C.....	78
Tabela 4 – Composição química das luvas EBT.....	79
Tabela 5 – Análises dos pontos e áreas da Figura 59.....	82
Tabela 6 – Análises dos pontos e áreas da Figura 60.....	83
Tabela 7 – Análises dos pontos e áreas da Figura 62.....	85
Tabela 8 – Análises dos pontos e áreas da Figura 64.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

AF	Alto-forno
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina
Al ₄ C ₃	Carbeto de alumínio
AlN	Nitreto de alumínio
B ₄ C	Carbeto de boro
BOF	Basic oxygen furnace
C	Carbono
C ₂ S	Silicato de cálcio
CaB ₂	Diboreto de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CO	Monóxido de carbono
Cu	Cobre
DRX	Difração de raios X
DTG	Termogravimetria derivada
EBT	Eccentric Bottom Tapping
EDS	Energy dispersive x-ray
EOF	Energy optimizing furnace
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (Hematita)
FEA	Forno elétrico a arco
FeO	Óxido de ferro (Wustita)
FRX	Fluorescência de raios X
FTIR	Espectroscopia Infravermelho por Transformada de Fourier
K	Temperatura Kelvin
LC	Lingotamento contínuo
LD	Linz-Donawitz
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mg	Magnésio
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês

MnO	Óxido de manganês
N ₂	Nitrogênio
P	Fósforo
RD	Redução direta
RF	Redução fusão
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício
SiO ₂	Óxido de Silício
Sn	Estanho
TG	Termogravimetria
ZrB ₂	Diboreto de zircônio
σ	Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO.....	17
2.1.1	Produção de Aço em Usinas Integradas.....	18
2.1.2	Produção de Aço em Usinas Semi-integradas.....	19
2.2	ACIARIA ELÉTRICA.....	19
2.2.1	Pátio de Sucatas.....	20
2.2.2	Refino Primário dos Aços em Forno Elétrico a Arco.....	21
2.2.3	Refino Secundário.....	24
2.2.4	Lingotamento Contínuo.....	25
2.3	REFRATÁRIOS.....	26
2.3.1	Refratários Usados em Fornos Elétricos a Arco.....	28
2.3.2	Refratário Magnesíticos.....	32
2.3.3	Refratários de Magnésia Carbono (MgO-C).....	34
2.4	MECANISMOS DE DESGASTE DOS MATERIAIS DOS REFRATÁRIOS.....	36
2.4.1	Corrosão Química.....	37
2.4.2	Mecanismos de Desgaste Termomecânicos.....	38
2.4.2.1	Choque Térmico.....	39
2.4.2.2	Abrasão e Erosão.....	40
2.5	ESCÓRIAS.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	DADOS TÉCNICOS DO FORNO EM ESTUDO.....	49
3.1.1	Montagem Refratária do Forno Elétrico a Arco.....	49
3.2	REFRATÁRIOS ESTUDADOS.....	53
3.2.1	Tijolos MgO-C.....	53
3.2.2	Massas Refratárias de Cura a Quente.....	54
3.2.3	Conjunto EBT.....	55
3.3	ANÁLISES REALIZADAS.....	56
3.3.1	Análise Granulométrica.....	57
3.3.2	MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).....	57
3.3.3	DRX (Análise de Difração por raios X).....	58

3.3.4	Análise Termogravimétrica (TG e DTG).....	58
3.3.5	Análise de Fluorescência de raios X (FRX).....	58
3.3.6	Análise por Infravermelho (FTRI).....	59
3.3.7	Ensaio de Sintetização.....	59
3.4	TESTE DOS REFROTÁRIOS EM OPERAÇÃO.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4.1	AVALIAÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO DA ACIARIA.....	62
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS REFROTÁRIOS.....	64
4.2.1	Caracterização dos Tijolos MgO-C.....	64
4.2.1.1	Análise por Imagem (Lupa Eletrônica).....	64
4.2.1.2	Caracterização Microestrutural (MEV/EDS).....	64
4.2.1.3	Difração de Raios X (DRX).....	69
4.2.1.4	Análise Termogravimétrica (TG e DTG) e Infravermelho (FTIR)...	71
4.2.2	Caracterização das Massas	74
4.2.3	Análise das Luvas EBT.....	79
4.3	RESULTADOS OPERACIONAIS.....	88
5	CONCLUSÕES.....	92
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

O aço é um dos materiais mais utilizados no mundo e por ser um produto pertencente à classe de commodities, seu preço normalmente é determinado pelo mercado, dessa forma, cabe às empresas atuarem internamente para reduzir ao máximo seus custos de produção.

O consumo de refratários por tonelada de aço produzido no Brasil tem diminuído constantemente ao longo dos anos, saindo de valores de 40 kg/t nos anos 70 para menos de 10 kg/t atualmente. Esse comportamento está bastante ligado ao fato dos fabricantes de refratários estarem constantemente desenvolvendo materiais de melhor qualidade e preços competitivos. Porém, para alcançar custos cada vez mais baixos é necessário um profundo conhecimento do processo de aciaria assim como a escolha correta dos materiais refratários.

Entretanto, a substituição dos materiais refratários em aciarias não é uma tarefa simples, pois os impactos de uma escolha mal executada de determinado componente refratário pode comprometer, além do custo do aço, o desempenho da aciaria e a segurança das pessoas. Sendo assim, é necessário um estudo detalhado dos materiais e processos para que as alterações, quando realizadas, tragam bons resultados operacionais e assegurem a segurança das pessoas.

Neste trabalho foram estudados os principais componentes refratários utilizados em fornos elétricos a arco. Com o objetivo de aumentar o conhecimento acerca das matérias primas, empregadas na confecção destes materiais, todos os refratários foram submetidos a análises microestruturais e de composição química. Além disso, uma parcela desses materiais foi selecionada e testada em escala industrial com o objetivo de comprovar a qualidade dos materiais, além de comparar diferentes tipos de refratários em condições de operação semelhantes.

Este trabalho tem como objetivo geral a diminuição do custo dos refratários dos fornos elétricos a arco, através do conhecimento detalhado dos materiais empregados e de possíveis materiais substitutos. Além disso, serão estudados dados históricos para compreender melhor a influência dos parâmetros de processo da Aciaria no consumo de refratários.

Os objetivos específicos do trabalho são caracterizar os principais materiais refratários utilizados em fornos elétricos a arco, testando os mesmos em escala industrial com o objetivo de correlacionar a microestrutura dos materiais com seu

desempenho em operação, identificando os refratários que melhor atendam as condições operacionais exigidas e que possuam o menor custo possível.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para nortear esse trabalho investigativo, e com finalidade de fundamentá-lo teoricamente, foram consultadas bibliografias publicadas e materiais correlatos.

Buscou-se construir uma visão abrangente acerca de pesquisas e contribuições anteriores relacionadas ao tema estudado, objetivando o aumento do conhecimento do autor sobre o tema, assim como o enriquecimento científico do trabalho.

Seguem na sequência, as bases conceituais sobre as quais recai o estudo realizado para a elaboração dessa dissertação.

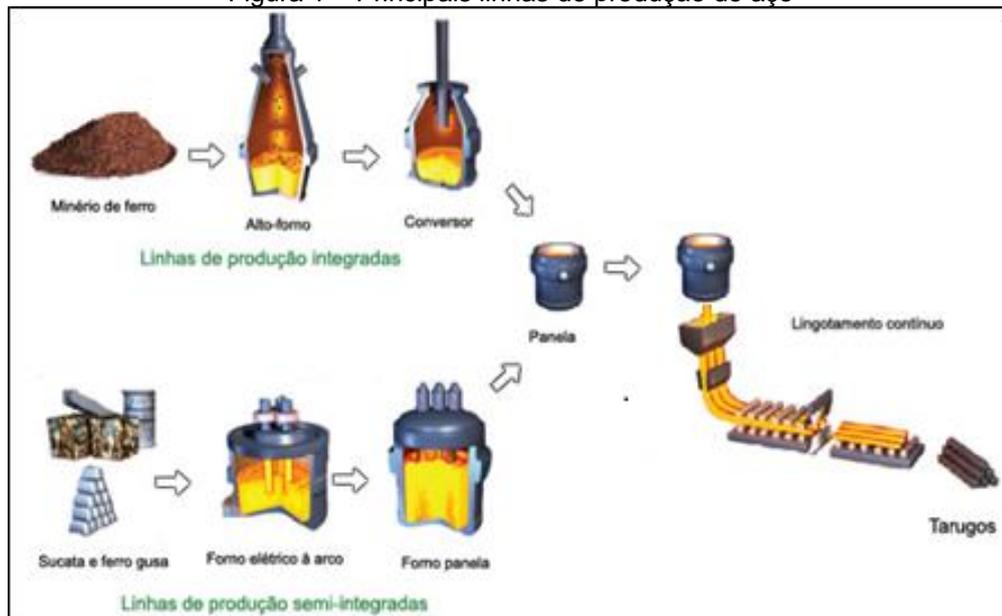
2.1 PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO

O aço é uma liga metálica que contém geralmente de 0,002 a 2,11% de carbono, além de outros elementos de liga, sendo empregado de forma intensiva em numerosas aplicações tais como máquinas, ferramentas e construções. Existem atualmente duas rotas principais para a produção de aço no mundo:

- a) Usinas Integradas: operam as três fases de transformação do processo siderúrgico – redução, refino e laminação, produzindo aço a partir do ferro-gusa líquido proveniente do alto-forno. A transformação do ferro-gusa em aço é feita em conversores a oxigênio (LD/BOF).
- b) Usinas Semi-integradas: operam somente duas fases do processo siderúrgico – refino e laminação, utilizando como carga metálica sucata, ferro-gusa e/ou ferro esponja, matérias-primas que são carregadas em fornos elétricos a arco (FEAs), onde é realizada a fusão da carga e refino primário do aço.

Ambas rotas podem ser identificadas na figura que segue.

Figura 1 – Principais linhas de produção do aço



Fonte: ROSSI (modificado), 2014.

Atualmente, dois terços do total de aço produzido no mundo (1,6 bilhões de toneladas) provém de usinas integradas com conversores a oxigênio (LD/BOF). Praticamente, o restante da produção mundial provém de usinas semi-integradas com fornos elétricos a arco. Existem também processos como o de redução direta (RD), redução fusão (RF) e EOF (Energy Optimizing Furnace). Porém, esses são responsáveis por um menor volume de produção (ROSSI, 2014).

2.1.1 Produção de Aço em Usinas Integradas

Em usinas integradas, a produção do aço tem como matéria-prima principal o minério de ferro e, como reatores, o alto-forno (AF) e o conversor da aciaria.

Sinteticamente, o alto-forno é um reator que opera em contracorrente, cuja carga metálica ferrosa, carregada pelo topo, desce em direção a uma “zona de reação”. Juntamente com a carga metálica, são carregados o coque ou o carvão vegetal, matérias-primas responsáveis por fornecer energia química e produzir os gases redutores.

A redução dos óxidos de ferro se processa, à medida que o minério, o agente redutor e os fundentes (calcário ou dolomita), descem em direção contrária aos gases oriundos da queima do carbono que reagem com o oxigênio do ar, soprado pelas ventaneiras, localizadas na parte inferior do alto-forno (ARAÚJO, 1997).

O produto do alto-forno chama-se ferro-gusa, (ferro com teores de carbono entre 4 e 5%), e o mesmo será utilizado como matéria prima no processo de refino, realizado em reatores conhecidos como conversores ou convertedores da aciaria. Nesses equipamentos, utiliza-se como carga, basicamente, ferro-gusa líquido, sucata de aço e fundentes. A composição química e temperatura do aço serão ajustadas pela injeção de oxigênio através de uma lança inserida pela parte superior do conversor.

As principais vantagens do processo LD/BOF são a alta produtividade, podendo atingir 600 toneladas por hora e a possibilidade de fabricação de uma vasta gama de tipos de aço (GUMIERI, 2002).

2.1.2 Produção do Aço em Usinas Semi-integradas

Usinas semi-integradas são plantas que não possuem a fase de redução, operando somente as fases de refino e laminação. Essas usinas utilizam como matéria-prima metálica o ferro-gusa, ferro esponja ou sucata metálica, adquiridas de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas para sua posterior laminação.

2.2 ACIARIA ELÉTRICA

Em uma aciaria elétrica se produz aços a partir da fusão de sucata metálica, ferro-gusa sólido ou ferro esponja em um forno denominado forno elétrico a arco. Abaixo, segue demonstração ilustrativa desse processo.

Figura 2 - Fluxo de produção típico de uma aciaria de aços carbono



Fonte: ROSSI (modificado), 2014.

A primeira etapa na produção de aço, em aciarias elétricas, é a separação e processamento da sucata no pátio de sucatas. Após a preparação das matérias-primas, o processo de produção de aço em aciarias elétricas pode ser dividido em três etapas principais:

- a) Refino Primário (oxidante): nesta etapa é realizada a fusão da carga metálica, retirados elementos como o Si, P, Al, Mn, ajustado o percentual de C e temperatura de vazamento do aço. Além disso, é realizada a adição de elementos de liga (ferroligas) no momento do vazamento do aço.
- b) Refino Secundário: nesse estágio da produção é realizado o acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento do aço.
- c) Lingotamento do aço: processo pelo qual o aço líquido é solidificado em um produto semi-acabado.

A seguir, são descritas as etapas supracitadas.

2.2.1 Pátio de Sucatas

A produção do aço em uma aciaria elétrica inicia no pátio de sucatas, local onde a sucata é recebida dos fornecedores, separada por tipo, em caso de necessidade processada, e estocada.

Segundo a NBR 16229 (ABNT, 2013) as sucatas podem ser classificadas em três categorias principais:

- a) Interna: gerada pela própria usina, constituída de cascões de panela, lingotes curtos, derramamentos de aço, pontas cortadas na tesoura de lingotes, de placas ou de tarugos, recortes da linha de acabamento, etc.
- b) De processamento: proveniente da transformação do aço em produto acabado, restos de estamparia, retalhos de chapa, etc.
- c) De obsolescência: comumente chamada de “ferro velho” que corresponde ao aço consumido em uma região nos últimos 15 a 20 anos.

O processamento da sucata ferrosa tem como finalidade retirar impurezas, reduzir seu tamanho e aumentar sua densidade, buscando diminuir a entrada de elementos nocivos ao aço (Cu, Sn, S, P) e aumentar a produtividade do forno.

Os principais métodos utilizados no processamento da sucata são os seguintes:

- a) Prensa tesoura: prensa a sucata e, em seguida, através de uma tesoura tipo guilhotina, corta a sucata. Em alguns casos esta sucata é transferida para um sistema vibratório para remover terra ou qualquer outro tipo de impureza.
- b) Shredder: equipamento composto por moinho e grelhas que promovem, além da retirada de material orgânico e terra, a retirada de material não ferroso como o alumínio, cobre etc.
- c) Prensa pacote: prensa responsável por gerar pacotes de sucata, geralmente utilizada para processar embalagens metálicas (latas de alimentos descartadas).
- d) Oxicorte: equipamento utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões, como navios, blocos de máquinas industriais, engrenagens de grandes dimensões, etc.

Além da sucata, utilizam-se no forno elétrico a arco o ferro-gusa sólido ou o ferro-esponja, conforme a disponibilidade da usina e custo das matérias primas.

Após o processamento da sucata, a mesma é carregada no cestão juntamente com outros insumos como, a cal calcítica, a cal dolomítica e em alguns casos, materiais carburantes. Dentro do cestão, a carga é distribuída criteriosamente a fim de se evitar danos ao interior do forno durante o descarregamento, e melhorar o desempenho do mesmo. Uma vez pronto, o cestão é transportado para o interior da aciaria, para abastecer o forno elétrico a arco.

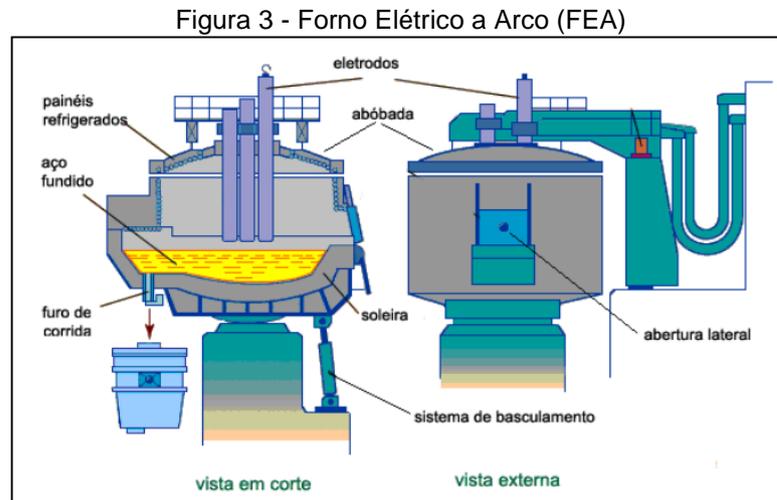
2.2.2 Refino Primário dos Aços em Forno Elétrico a Arco

Originalmente, o FEA era somente uma unidade de fusão para reciclar sucata de aço. Atualmente, devido a numerosas modificações, tem se tornado um reator elétrico e químico (MOURÃO, 2007). Pela possibilidade de controlar a temperatura do banho, as condições de oxidação e de redução da escória, logo foram reconhecidas as vantagens de utilização do FEA para a produção de aços de qualidade, sendo que seu campo de aplicação estendeu-se também a aços menos nobres. Hoje em dia, com o desenvolvimento das mini usinas, o FEA é responsável por mais de 30% da produção mundial de aço (ARAÚJO, 1997).

O forno elétrico a arco é composto basicamente por uma carcaça metálica revestida por material refratário e painéis refrigerados. Esta carcaça é coberta pela abóbada, através da qual descem os eletrodos de grafita, que são os condutores de

eletricidade responsáveis pela formação do arco elétrico e pela transferência de energia para a sucata, a fim de promover a fusão da carga (JOHN, 2009).

A Figura 3, ilustra o Forno Elétrico a Arco (FEA).



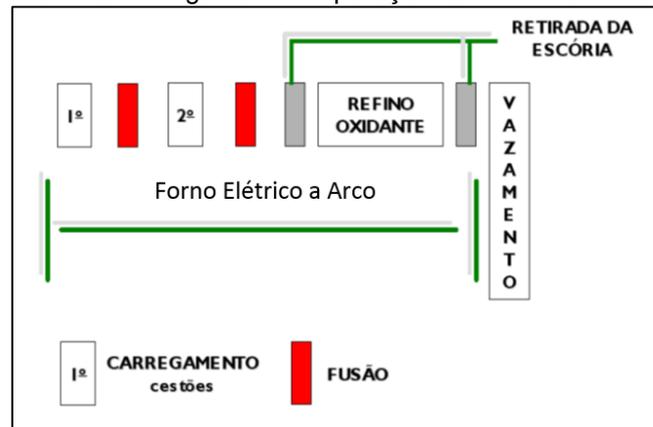
O FEA possui três aberturas principais:

- a) Abóbada: abertura superior para o carregamento do forno;
- b) Porta de escória: por onde se realiza a retirada da escória, injeta-se oxigênio e carburante, coletam-se amostras de aço e verifica-se a temperatura do banho;
- c) Bica de vazamento: por onde é vazado o aço do interior do forno.

A operação do forno elétrico a arco pode ser subdividida em quatro etapas principais: carregamento, fusão, refino oxidante e vazamento.

O carregamento é realizado após a subida dos eletrodos e abertura da abóbada. Normalmente é realizado mais de um carregamento por corrida como está demonstrado na Figura 4 (exemplo para dois carregamentos).

Figura 4 - Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense



Fonte: VILELA (adaptado), 2008.

A fusão da carga é realizada por meio do arco elétrico formado entre os eletrodos e a sucata, e pela energia química fornecida pelos injetores, que ficam posicionados principalmente em regiões não cobertas pelo arco elétrico (pontos frios).

Em relação aos injetores, grande parte dos fornos utiliza a tecnologia de injetores multifuncionais que operam como queimadores e injetores de oxigênio. Em relação à injeção de oxigênio, existem dois tipos principais de jatos, os jatos supersônicos convencionais e supersônicos coerentes (Figura 5).

Figura 5 - Jato supersônico convencional e jato supersônico coerente

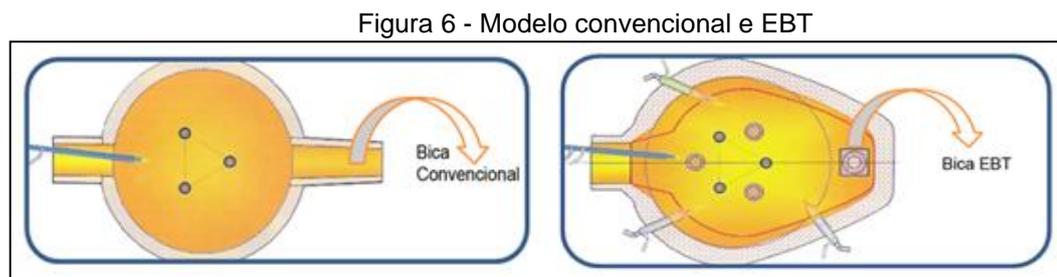


Fonte: MATHUR; MESSINA, 2001.

Os jatos coerentes se caracterizam por conseguir, praticamente, manter sua forma original desde a saída do bico injetor. Já o jato convencional é mais suscetível a perder sua forma original, diminuindo sua velocidade. Um jato sem coerência causa maior formação de respingos e aumenta a quantidade de oxigênio na atmosfera do banho e, muitas vezes, não é capaz de ultrapassar a escória gerando oxidação excessiva. Por outro lado, o jato coerente penetra no aço líquido sem gerar respingos e reage com os elementos dissolvidos no banho (ROSSI, 2014).

No refino oxidante, além da injeção de oxigênio para o fornecimento de energia química e ajuste da composição, é injetado material carbonoso (usualmente coque de petróleo) para a formação da escória espumante, que será retirada do forno antes do vazamento do aço. As principais funções da escória espumante são: aumentar a eficiência da transferência de energia do arco elétrico para o banho, proteção do banho contra a atmosfera e diminuição de perdas térmicas do forno (VILELA, 2008).

Em relação ao sistema de vazamento existem duas configurações principais de fornos elétricos: com bica convencional e bica EBT (*eccentric bottom tapping*). Nos fornos com bica convencional, o aço é retirado por uma bica lateral, já nos fornos; com o sistema EBT, o aço é vazado por uma bica excêntrica, posicionada na parte inferior do forno.



Fonte: FIGUEIRA (adaptado), 2007.

Após o vazamento, o aço é encaminhado ao refino secundário, processo que é executado em equipamento denominado forno panela.

2.2.3 Refino Secundário

O refino secundário é realizado fora do equipamento de fabricação do aço bruto (Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio) (MOURÃO, 2007). Pela maior precisão e melhor ajuste da composição química e temperatura do aço, grande parte das usinas siderúrgicas utiliza a técnica de metalurgia da panela, já que as reações metalúrgicas ocorrem na própria panela em que o aço é vazado.

Os principais processos de refino realizados no forno-panela são:

- a) Desoxidação;
- b) Dessulfuração;
- c) Desgaseificação (retirada de hidrogênio e nitrogênio).

Além disso, no Forno Panela, pode ser realizado o ajuste da composição química e temperatura do aço, e a alteração da morfologia de inclusões. Depois de finalizado o refino secundário, o aço está pronto para ser encaminhado ao lingotamento contínuo onde será solidificado.

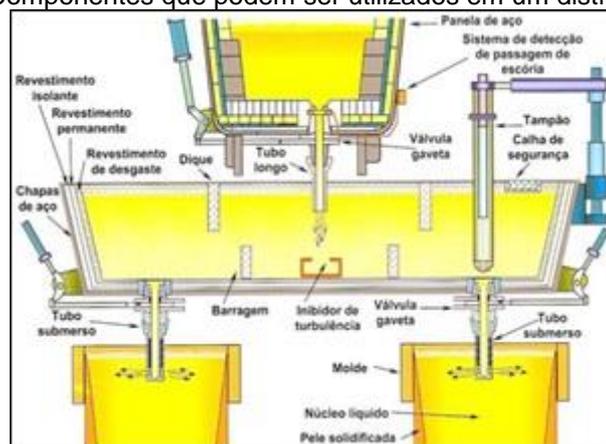
2.2.4 Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo (LC) dos aços é o último estágio em aciaria em que se trabalha com o metal ainda no estado líquido. O lingotamento contínuo tem como missão solidificar o aço em uma forma desejável de tal maneira que possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva. (MOURÃO, 2007).

Após o final do refino secundário, a panela em que o aço foi vazado é transportada ao lingotamento contínuo sendo posicionada sobre o distribuidor. Este é um recipiente formado por uma carcaça metálica revestida por refratários, que tem como funções principais armazenar o aço líquido entre a panela e os moldes, e alimentar os veios. O fluxo do aço da panela para o distribuidor é controlado por um sistema de movimentação do tampão, ou mais modernamente chamado de válvula gaveta. (ARAÚJO, 1997).

A Figura 7 apresenta os dois sistemas.

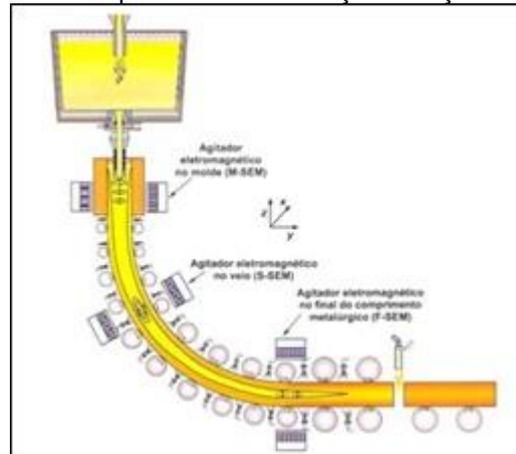
Figura 7 - Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC



Fonte: RIZZO, 2006.

O aço do distribuidor é vazado pelos veios para o molde (Figura 8), o qual é considerado a parte mais importante do lingotamento contínuo. Nele, ocorre o início da solidificação do aço líquido e é quando se definirá o perfil do produto chamado bloco, placa ou tarugo (MOURÃO, 2007).

Figura 8 - Esquema de solidificação de aço no molde



Fonte: RIZZO, 2006.

Como visualizado na Figura 8 (exemplo de lingotamento de placas), abaixo do molde as máquinas de lingotamento possuem um sistema de rolos os quais tem por função suportar o peso do tarugo e conduzi-lo para fora da máquina, dando lugar ao novo aço que entra no molde. Após passar pelos rolos, o tarugo é cortado na dimensão especificada e está pronto para ser encaminhado ao beneficiamento interno ou comercializado ao cliente externo.

2.3 REFRAATÁRIOS

Refratários são materiais estruturais utilizados em grandes volumes na indústria do aço, fornos de vidro e fornos para fabricação de cimento. Geralmente, são produzidos na forma de tijolos pré-queimados ou na forma de materiais monolíticos crus, aplicados por moldagem ou projeção (LEE; ZHANG, 1999).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2001), na norma NBR 10237 (Materiais Refratários – Classificação), do ponto de vista químico, os refratários podem ser classificados como ácidos, básicos ou neutros.

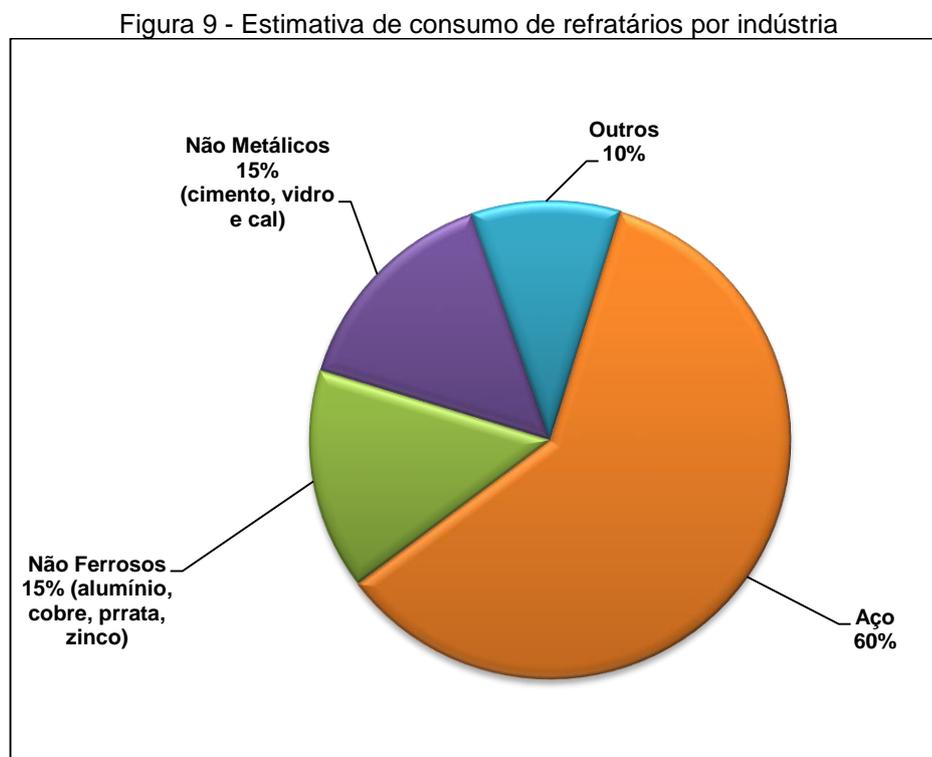
Os refratários ácidos contêm grandes quantidades de sílica e alumina e reagem com escórias básicas. Esses materiais podem ser subdivididos em duas subclasses principais, os refratários silicosos e os silicoaluminosos.

Refratários básicos são refratários cujo constituinte principal é a cal, magnésia ou ambos, e que podem reagir com escórias ácidas em elevadas temperaturas. Os refratários básicos podem ser subdivididos em refratários magnesianos, magnésiano-cromíticos, cromomagnesianos, dolomíticos e de magnésia-carbono.

Refratários neutros são resistentes ao ataque químico de escórias ácidas ou básicas em altas temperaturas tais como, refratários aluminosos, de alumina-carbono, de alumina-carbeto-carbono, de sílico-carbono, aluminosos-cromíticos, cromíticos, de carbono, e grafíticos.

Os materiais refratários desempenham um importante papel na indústria do aço, sendo responsáveis por cerca de 60% do consumo em termos de volume (LOBATO, 2009).

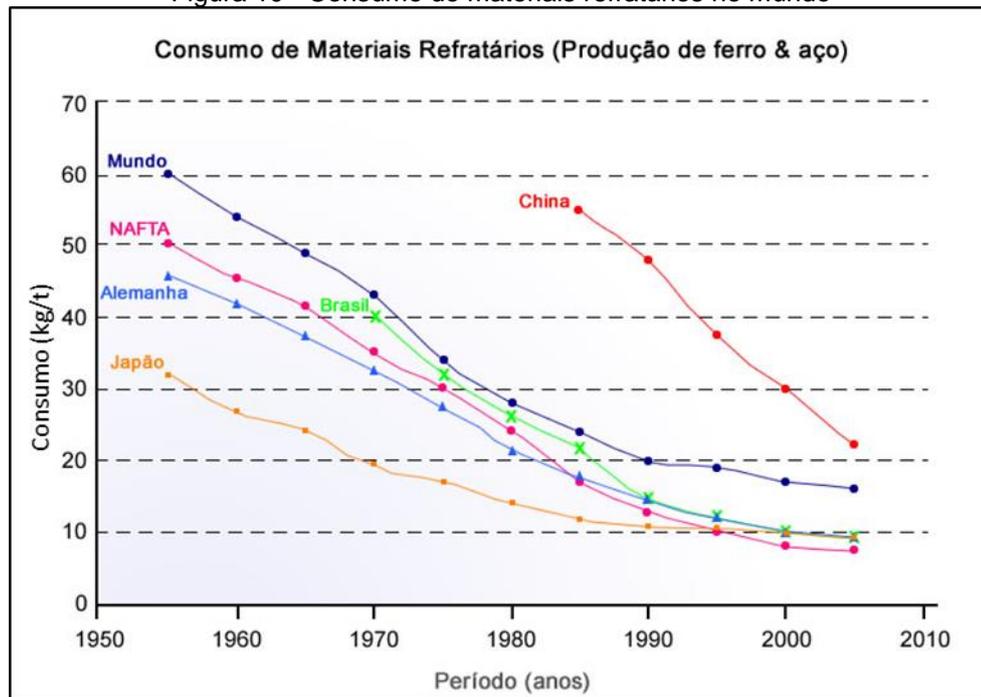
Na Figura 9, representa-se o consumo de refratários.



Fonte: LOBATO, 2009.

A produção de refratários para a siderurgia tem aumentado ao longo dos anos. Entretanto, o aumento da produção de refratários está atrelado ao aumento da produção de aço, já que o consumo específico de refratários por tonelada de aço produzido vem decrescendo, conforme indica a Figura 10.

Figura 10 - Consumo de materiais refratários no mundo



Fonte: ABM, 2015.

A redução do consumo específico de refratários é uma tendência nacional e mundial resultante do aprimoramento dos produtos e processos. Como pode ser observado na Figura 10, na década de 60 precisava-se de 30 kg ou mais de refratários para produzir uma tonelada de aço; em 1985; eram necessários por volta 20 kg para produzir a mesma tonelada de aço, quantidade, que hoje, está abaixo dos 10 kg (LOBATO, 2009).

2.3.1 Refratários Utilizados em Fornos Elétricos a Arco

De forma geral, a construção dos fornos elétricos a arco pode ser dividida em tijolos permanentes, tijolos de trabalho e massas refratárias (massas de cura a quente). Normalmente, como primeiro revestimento da carcaça metálica do forno elétrico a arco, são utilizados tijolos permanentes magnesianos, podendo ser utilizada mais de uma camada deste material (Figura 11, detalhe A).

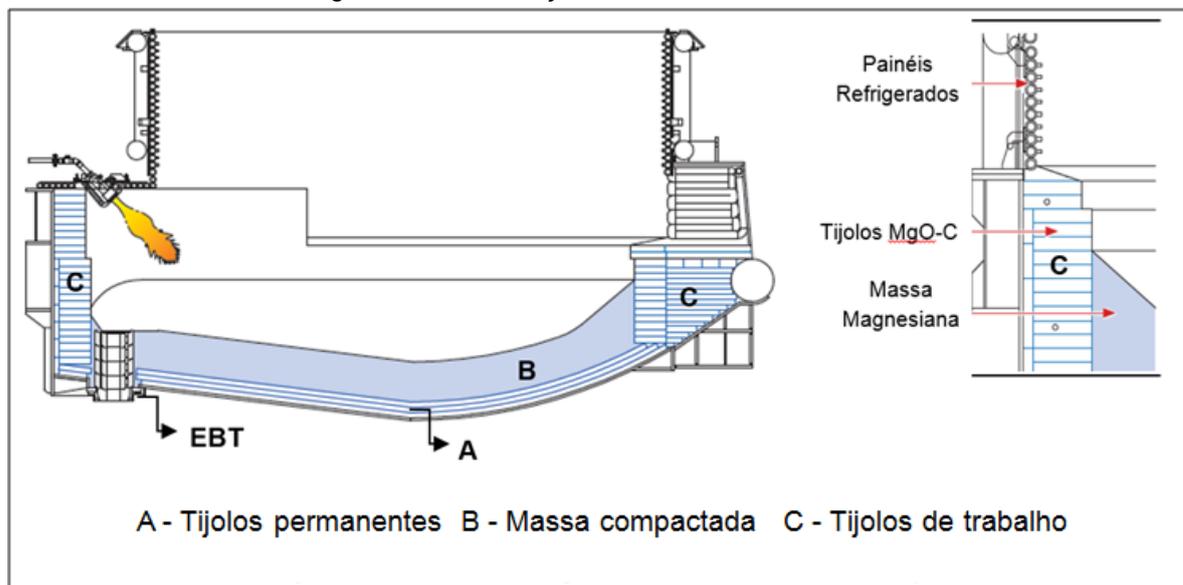
Acima dos tijolos permanentes da soleira do forno é colocada uma camada de massa refratária seca (Figura 11, detalhe B), a qual entrará diretamente em contato com o aço líquido e a escória formada no FEA. A resistência mecânica dessa camada é consequência de sua sinterização no decorrer das primeiras corridas da campanha. As massas refratárias utilizadas em fornos elétricos são compostas

basicamente de MgO e CaO. O que diferencia a composição de massas de soleira, rampa e reparo a quente, são os aditivos responsáveis pela sinterização.

Durante a instalação e compactação da massa refratária, são utilizadas formas metálicas que ao final da aplicação são retiradas criando o perfil desejado para o forno.

As paredes laterais (linha de metal e linha de escória) são montadas utilizando-se tijolos a base de MgO-C (Figura 11, detalhe C). A montagem correta do forno é de suma importância para o processo, tendo influência direta no volume útil e, conseqüentemente, na capacidade de carregamento, eficiência dos injetores, consumo de eletrodos, entre outros fatores.

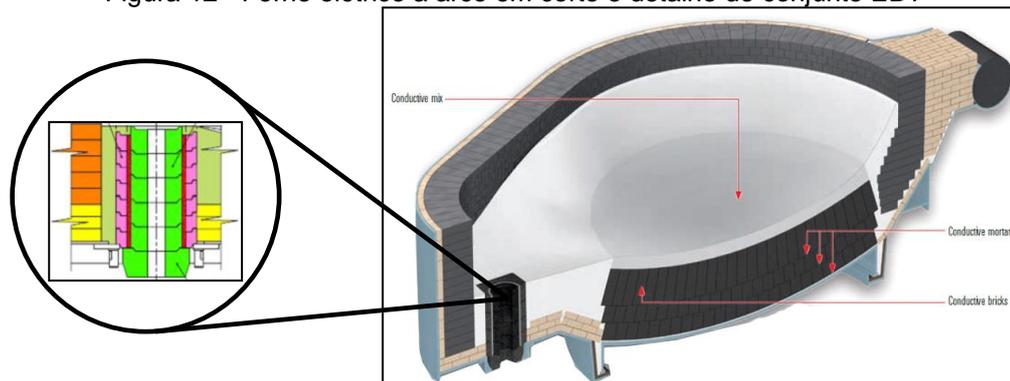
Figura 11 – Construção do Forno Elétrico a Arco



Fonte: RHI, 2013.

O canal EBT (*Eccentric Bottom Tapping*), também denominado de 'furo de corrida' no jargão industrial, é outro importante componente refratário do forno. Ele é composto por um conjunto de peças refratárias segmentadas, denominadas luvas refratárias, as quais são montadas uma sobre a outra formando um canal por onde se dá o fluxo do aço do forno para a panela (Figura 12).

Figura 12 - Forno elétrico a arco em corte e detalhe do conjunto EBT



Fonte: RHI, 2013.

O canal EBT trouxe muitos ganhos para o processo de aciaria quando comparado a bica convencional. Dentre eles pode-se citar: a redução de passagem de escória do FEA para a panela, a possibilidade de manter certa quantidade de aço no forno, para auxiliar na fusão do próximo carregamento, e a segurança operacional. Como desvantagem, tem-se o alto custo dos materiais refratários empregados no canal EBT.

Na Tabela 1, pode-se observar os diversos tipos de refratários utilizados por região e sub região do forno. Basicamente, os refratários permanentes ou de segurança são compostos por tijolos magnesianos. Já os tijolos de trabalho (que tem interação com o aço e escória), são à base de MgO-C, assim como o canal EBT.

Tabela 1 - Refratários utilizados por região e sub-região do forno

Região	Sub-região	Família de Refratários
Permanente	Fundo e Parede	Magnesianos
Linha de Metal	Parede	Magnesia-Carbono
Linha de Escória	Linha de Escória	Magnesia-Carbono
	Injetores	Magnesia-Carbono
Furo de Corrida	EBT	Magnesia-Carbono
Massas	Soleira	Massas Magnesianas
	Rampa	
	Reparo a Quente	

Conforme referido anteriormente, dentre os materiais utilizados na construção de Fornos Elétricos a Arco, podemos identificar:

- a) Tijolos: os tijolos permanentes ou de segurança, comumente utilizados em fornos elétricos a arco, são tijolos magnesianos. Esses materiais são amplamente empregados graças a suas características de excelente resistência ao ataque por escórias básicas e baixa vulnerabilidade ao ataque por óxidos de ferro. Em relação aos tijolos de trabalho, os refratários mais utilizados em FEAs são da classe dos MgO-C por possuírem uma excelente resistência a oxidação e baixa degradação pela escória. Os tijolos refratários serão estudados mais profundamente no decorrer deste trabalho.
- b) Massas: as massas secas são amplamente utilizadas na construção de fornos elétricos, sendo compostas basicamente por MgO e CaO, tendo variações nos teores de Fe_2O_3 e SiO_2 , óxidos que afetam sua fusibilidade. As massas à base de MgO e CaO são muito utilizadas na produção de aço devido, principalmente, ao seu caráter básico e a boa disponibilidade do mineral, além da relativa facilidade de fabricação (TOMBA MARTINEZ, 2009). Em relação a composição química das massas, os altos teores de MgO proporcionam resistência ao ataque do FeO presente na escória. Embora, certos teores de FeO presentes nas massas auxiliem na sinterização, níveis elevados de FeO podem comprometer a refratariedade do material. O CaO neutraliza a infiltração da SiO_2 presente na escória. A SiO_2 é uma impureza indesejada nas massas refratárias por causar a diminuição da refratariedade (ECKSTEIN; ZETTL; WAPPEL, 2013). A sinterização das massas secas depende fortemente da quantidade e tipo dos componentes minoritários da mistura SiO_2 , Al_2O_3 e $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$. Segundo a literatura, o Fe_2O_3 melhora a sinterização no processo de fabricação da dolomita. Os óxidos de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$) aumentam a capacidade de sinterização do material pela formação de um líquido transitório de ferrita de cálcio ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) e magnésio wustita (MgO/FeO) que, no entanto, podem desestabilizar a fase periclásio (MgO) (YEPREM, 2007). As massas utilizadas em fornos elétricos a arco são geralmente aplicadas por vibração ou compactação, adquirindo resistência mecânica durante a operação do forno, através da sinterização que se dá pela interação térmica com a escória e o aço líquido. A sinterização das partículas refratárias no topo da camada de massa é muito importante, pois

evita taxas de desgaste elevadas durante a campanha do forno. Uma baixa taxa de desgaste diminui a frequência de reparação do forno, o consumo de refratários e o risco de temperaturas altas na carcaça metálica (CHESTERS, 1973). Resumidamente, os principais requisitos das massas para modernos fornos elétricos são:

- i. Fácil e rápida aplicação;
- ii. Excelente comportamento de sinterização e rápida ligação cerâmica;
- iii. Alta densidade e baixa porosidade em operação;
- iv. Alta estabilidade mecânica e resistência ao impacto de sucata;
- v. Alta resistência ao aço líquido e ao ataque de escória; Alta resistência à erosão a quente (ECKSTEIN; ZETTL; WAPPEL, 2013).

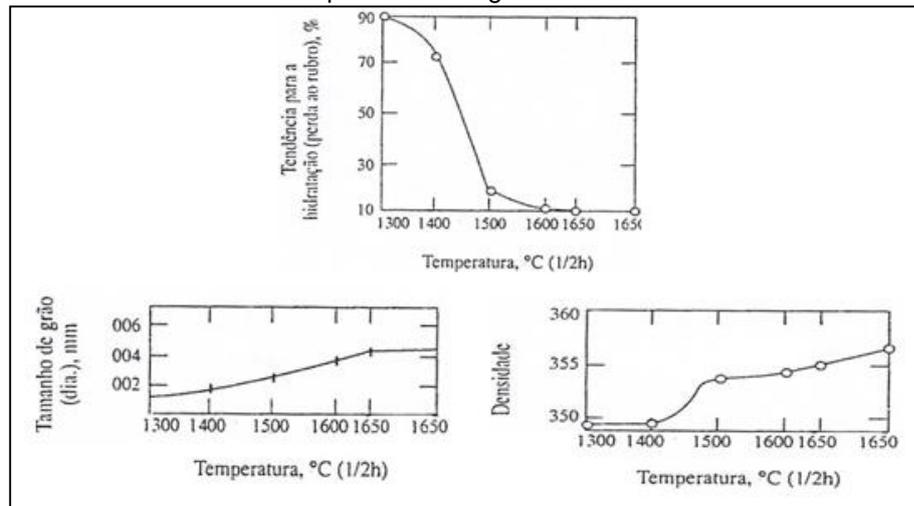
2.3.2 Refratários Magnesíticos

A maioria dos refratários magnesianos são produzidos a partir de sinter de periclásio sintético proveniente da água do mar ou de depósitos ricos em magnésia, como as magnesitas ($MgCO_3$) (JONES, 2001).

A calcinação tem grande importância na produção da matéria prima para a produção de refratários de qualidade. Esse processo gera o crescimento de cristais de periclásio por coalescência, com segregação das impurezas. A calcinação é realizada até o início da fusão dos constituintes mais fusíveis que aglutinam os grãos formando aglomerados bastante duros e de dimensões convenientes para a fabricação industrial.

Para a produção de refratários de melhor qualidade, pode ser utilizada magnésia queimada à morte (magnésia não reativa do ponto de vista de hidratação). Esse material é obtido por processo de calcinação em fornos rotativos a temperaturas de cerca de $1800^{\circ}C$. Nesse processo (Figura 13), com o aumento da temperatura, os cristais de magnésia crescem, a área superficial diminui e, portanto, a tendência à hidratação diminui; como os poros tendem a desaparecer (pela retração do material), a densidade aumenta (SEGADÃES, 1997).

Figura 13 - Efeito do tratamento térmico sobre a tendência à hidratação, tamanho de grão e densidade de compostos de magnésia levemente calcinada



Fonte: SEGADÃES, 1997.

Segundo Segadães (1997), pode-se destacar três vantagens da queima à morte: evitar a reidratação pelo crescimento dos cristais, formar aglomerados de cristais pela ligação por um cimento resultante das impurezas e aditivos e evitar que haja retração durante a queima dos refratários em sua produção.

Outra matéria-prima bastante utilizada atualmente para a produção de refratários de alta qualidade é a magnésia fundida. As magnésias fundidas são constituídas por grandes cristais de periclásio (500-1000 Mm) que propiciam maior estabilidade em temperaturas elevadas, gerando uma melhor resistência à corrosão pelas escórias (grãos sinterizados dissolvem-se mais facilmente).

As principais vantagens da utilização dos refratários básicos magnésíticos são: o alto ponto de fusão do periclásio (superior a 2800°C), sua excelente resistência ao ataque pelos óxidos de ferro, alcalinos e fundentes ricos em cal. Além disso, a magnesite não está sujeita a oxidação e não é tóxica. A sua principal limitação é a elevada expansão térmica, que torna difícil, embora não impossível, produzir tijolos com elevada resistência ao choque térmico (SEGADÃES, 1997).

Com o objetivo de melhorar as propriedades dos refratários à base de MgO, outros elementos são adicionados na sua fabricação surgindo, assim, subclasses desses materiais.

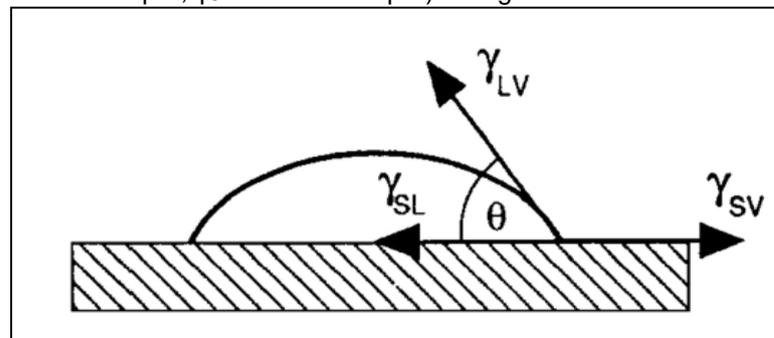
2.3.3 Refratários de Magnésia Carbono (MgO-C)

Refratários de magnésia carbono são essenciais para a produção de aço em indústrias siderúrgicas e, geralmente, são compostos de fases elementares (C, Al e Si), fases não oxidadas (SiC), óxidos inorgânicos (MgO e Al_2O_3) e fases orgânicas (ligantes), além de outros aditivos e impurezas (AZA et al, 2006).

As adições do carbono aos refratários de MgO proporcionaram um melhor desempenho em serviço, no processo de produção do aço. Devido a sua estrutura cristalina, “flocos” naturais de grafite são comumente utilizados em tijolos de MgO-C. A adição de carbono proporciona baixo molhamento pela escória, alta estabilidade química quando em contato com escória líquida, alta condutividade térmica e baixa expansão térmica, melhorando a resistência ao choque térmico desses materiais (JANSSON; BRABIE; JÖNSSON, 2005).

A diminuição do molhamento do refratário pelo metal líquido e escória é consequência da alteração da energia de superfície causada pela adição de carbono. O molhamento da superfície dos refratários, seja por metais fundidos ou pela mistura de escória e metal, afeta significativamente o comportamento de corrosão e erosão destes materiais. A extensão do espalhamento de um líquido indica como ele molha a superfície de um sólido e, geralmente, esse efeito é quantificado pelo ângulo de contato (θ) gerado no ponto triplo entre as fases em equilíbrio (LUZ; PANDOLFELLI, 2007).

Figura 14 – Representação das Energias Interficiais (γ_{SL} - Sólido - Líquido, γ_{LV} - Líquido - Vapor, γ_{SV} - Sólido - Vapor) e Ângulo de Contato



Fonte: LUZ, 2012

Na Figura 14, valores de (θ) menor que 90° correspondem à molhagem da superfície enquanto valores superiores indicam um ‘não molhamento’.

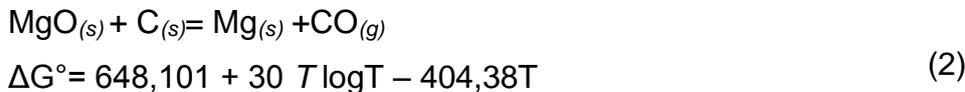
Entretanto, a adição de carbono tem como principal desvantagem a alta susceptibilidade à oxidação em altas temperaturas. A consequência imediata da oxidação de refratários contendo carbono é a perda de resistência mecânica devido ao aumento da porosidade, o que promove uma redução de resistência à penetração do aço e escória, intensificando o processo de deterioração do refratário (LUZ; PANDOLFELLI, 2007).

Segundo a literatura (SADRNEZHAAD *et al*, 2006) existem dois mecanismos responsáveis pela oxidação de tijolos de MgO-C:

- a) Oxidação direta que ocorre a temperaturas abaixo de 1400°C.



- b) Oxidação indireta, que ocorre a temperaturas acima de 1400°C.



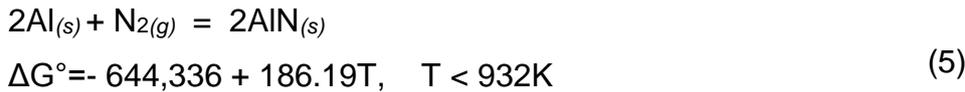
A oxidação direta do carbono com o oxigênio gasoso inicia-se entre 400° e 1200°C e $P_{O_2} \geq 10^{-4}$ ATM (1). Em temperaturas superiores a 1400°C, a oxidação indireta torna-se rapidamente predominante com os óxidos sólidos ou líquidos ou subóxidos gasosos presentes no sistema (2) (RIGAUD, 1995).

Atualmente, com o objetivo de minimizar a oxidação do carbono contido no refratário, tem-se adicionado elementos conhecidos como antioxidantes. Um desses elementos que tem sido amplamente utilizado em refratários de MgO-C é o alumínio, graças a sua capacidade de reagir com o carbono, formando compostos que afetam o comportamento dos componentes do refratário conforme as reações (3,4) (SADRNEZHAAD *et al*, 2006).





Outras reações também podem ocorrer alterando o comportamento de oxidação dos tijolos refratários, conduzindo para taxas de oxidação mais baixas (5).



Segundo a literatura, existe um consenso de que há um valor ótimo na quantidade de alumínio a ser adicionada aos refratários. Alguns aspectos devem ser considerados, tais como: tamanhos das partículas do pó, etapas do processamento do refratário e a porosidade inicial das peças. O excesso de Al poderá levar a diminuição de resistência mecânica devido à formação de poros abertos e até a diminuição de resistência à corrosão (LUZ, 2012).

Além do alumínio, outros antioxidantes também podem ser utilizados na forma de pós metálicos (Mg, Si, ligas metálicas), carbetos (SiC, B₄C), boretos (ZrB₂, CaB₂) ou uma combinação destes. A seleção dos antioxidantes varia com o material da matriz do refratário.

2.4 MECANISMOS DE DESGASTE DOS MATERIAIS DOS REFRAATÁRIOS

Quando em serviço, os materiais refratários devem resistir a altas temperaturas, tensões mecânicas, ter boa resistência ao ataque do metal líquido, escórias ou atmosferas corrosivas (LEE; ZHANG, 1999).

O desgaste de refratários é em geral um processo que ocorre gradualmente, tendo como principal fator a corrosão química, sendo em alguns casos fortemente acelerado devido aos danos causados por oscilações térmicas. De acordo com o tipo de refratário empregado e a região em que o mesmo se encontra, o grau de corrosão química pode variar bastante na degradação do material. Fenômenos mecânicos também podem ter importante influência, como a erosão, abrasão e esforços de compressão, flexão e tração (BRAGANÇA, 2012).

2.4.1 Corrosão Química

No processo de aciaria elétrica, os refratários são normalmente lavados por metais ou escórias fundidas. As escórias são soluções iônicas constituídas de óxidos de metais fundidos e fluoretos que flutuam no aço líquido. A escória é constituída de uma fração líquida e uma fração sólida. A medida que a fração sólida da escória aumenta a fluidez diminui modificando a condição da escória de líquida para “cremosa” e até para “dura” ou sólida.

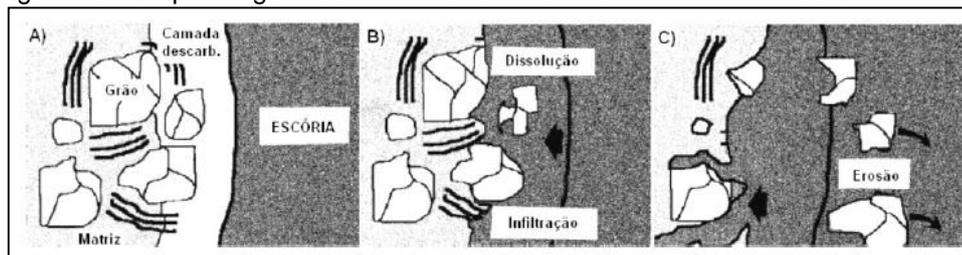
Conforme Jansson, Brabie e Jönsson (2005), o processo de corrosão pode ser definido como qualquer tipo de interação entre a fase sólida e a fase líquida, resultando em efeitos deletérios sobre qualquer uma das fases. A resistência dos refratários à escória pode ser determinada por relações de equilíbrio. Conforme é conhecido, uma escória que já se encontra saturada com uma determinada fase sólida não atacará um refratário constituído da mesma fase sólida.

A taxa de corrosão é função de muitas variáveis tais como temperatura (refratário/líquido/interface), composição, densidade do líquido, viscosidade, difusividade, e grau de agitação do meio (LEE; ZHANG, 1999).

Ainda, segundo os mesmos autores (2004), a corrosão dos refratários em contato com escórias é um mecanismo que se processa em 3 estágios:

- c) A oxidação do carbono amorfo ou do grafite que causa um aumento da molhagem, favorecendo a penetração ou infiltração da escória na porosidade do refratário;
- d) Processo químico de dissolução do refratário na escória líquida;
- e) Erosão e retirada dos agregados expondo novamente o refratário ao ataque pelos gases e escória.

Figura 15 - Esquema geral do mecanismo de corrosão de refratários óxido-carbono

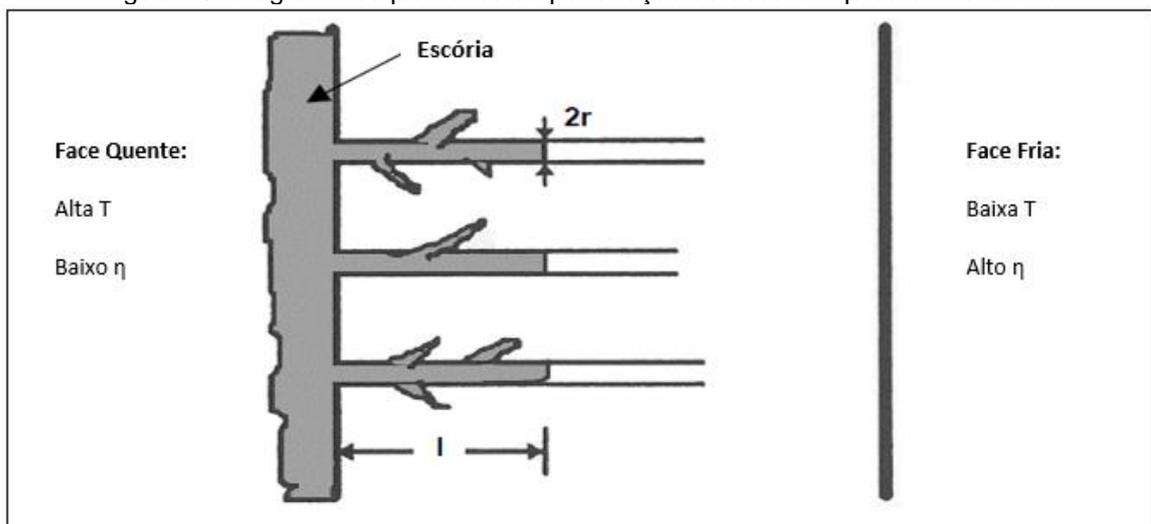


Fonte: LEE; ZHANG, 2004.

As zonas dos refratários que se encontram na interface metal/escória, invariavelmente, estão sujeitas a corrosão mais forte do que as demais regiões (região de contato com o metal ou interface escória/ar). Quando comparadas a zona de contato refratário/metal é a que possui a menor deterioração (SEGADÃES, 1997).

Além disso, a corrosão química tem relação direta com a porosidade do refratário (volume de poros acessíveis, tamanho e distribuição desses poros) e com as propriedades do líquido. Capilaridades (poros abertos ou micro trincas) são os principais canais de penetração de escória primária em um tijolo refratário poroso. A temperatura do tijolo também tem um efeito significativo sobre a profundidade da penetração através do seu efeito sobre a viscosidade. A medida que a temperatura diminui da face quente para a face fria do tijolo, a viscosidade da escória aumenta até que se torne demasiado viscosa para continuar penetrando no refratário (JONES, 2001).

Figura 16. Diagrama esquemático da penetração de escória líquida em refratário



Fonte: LEE; ZHANG, 1999.

2.4.2 Mecanismos de Desgaste Termomecânicos

São dois os mecanismos de desgaste dos materiais refratários, considerados do tipo termomecânico: o choque térmico e a abrasão e/ou erosão.

2.4.2.1 Choque Térmico

Conforme bibliografia consultada, a resistência ao choque térmico é a capacidade de um material manter a forma original sem fender, abrir ou lascar, quando sujeito a variação brusca de temperatura.

Segundo (NORTON, 1949), trincas ou danos nos materiais refratários estão associados a mecanismos indutores de tensão causados normalmente por:

- a) Gradientes de temperatura abruptos (aquecimentos e resfriamentos suficientemente capazes de gerar tensões que excedam a resistência do material);
- b) Diferença nos coeficientes de expansão térmica entre camadas do revestimento;
- c) Compressão do revestimento devido a variações permanentes de volume.

Para (CUNHA-DUNCAN; BRADT, 2003), as fraturas causadas por choque térmico podem, em alguns casos, ser catastróficas, resultando na completa perda do revestimento refratário. Em outros casos, podem causar danos pela formação de trincas (*spalling*) trazendo uma significativa redução da vida útil do refratário. Entretanto, a fratura não precisa necessariamente ser catastrófica; as trincas da superfície podem simplesmente propagar, diminuindo a resistência mecânica.

Quando a tensão térmica gerada for maior que a resistência a fratura do corpo, ter-se-á a fratura por choque térmico.

$$\sigma_{\text{térmica}} > \sigma_{\text{fratura}}$$

A tensão térmica pode ser definida por $\sigma_{\text{térmica}} = E\alpha(\Delta T)$ onde E é o módulo de elasticidade, α o coeficiente de expansão térmica e ΔT a variação da temperatura.

Resistências mecânicas e densidades elevadas são desejáveis para que o refratário possua boa resistência a corrosão e abrasão, mas essas propriedades são prejudiciais para a resistência ao choque térmico do material.

Em relação à resistência mecânica uma estrutura refratária pode ficar sujeita a dois tipos de esforços externos:

- a) Esforços limitados pela tensão: esforço causado pela carga aplicada sobre o refratário. Esse esforço deve ser contido pela resistência da estrutura

(resistência à fratura deve ser maior que a carga aplicada) e, para tal, são importantes os dados de resistência à compressão a quente e módulo de ruptura.

- b) Esforços limitados pela deformação: esforço causado por variações de temperatura e pela constrição térmica da estrutura. Para avaliar a resistência do material a cargas térmicas, devem-se avaliar os dados de deformação limite da estrutura.

Para a maior parte das estruturas refratárias, os esforços limitados pela tensão são muito menores que os esforços limitados pela deformação, portanto, a deformação limite é o parâmetro de resistência mecânica mais adequada para avaliar se uma estrutura refratária pode resistir às forças aplicadas.

2.4.2.2 Abrasão e Erosão

A resistência à abrasão e à erosão são propriedades importantes dos refratários, especialmente quando aplicados em zonas de fluxo de material particulado (abrasão) ou em contato com fluídos em movimento (erosão) (SILVA, 2007)

A resistência à abrasão depende da dureza e da resistência das ligações entre os grãos que formam o material. A dureza específica dos grãos determinará a dureza geral do produto, mas o tipo de ligação entre os grãos pode ser fator determinante. Durante a elevação de temperatura na zona de comportamento elástico do material, a resistência à abrasão diminui, e quando se entra no comportamento plástico, a resistência aumenta com a temperatura pela formação de líquido viscoso. Por fim, em temperatura elevada, a resistência diminui com a diminuição da viscosidade do líquido. Resumidamente, a resistência à abrasão diminui se a superfície do refratário amolecer (SEGADÃES, 1997).

A determinação da resistência à abrasão é normalmente obtida pela medida da perda de massa do corpo-de-prova refratário, sujeito a um fluxo de material particulado, usualmente carbetto de silício. A quantidade, o ângulo de jateamento e a granulometria do agente abrasivo devem ser controlados. Normalmente, os materiais que apresentam elevado módulo de ruptura e elevada resistência à compressão a frio apresentam elevada resistência à abrasão (LEE; MOORE, 1998).

2.5 ESCÓRIAS

A escória tem papel fundamental nas reações de refino, influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição final do aço devido ao equilíbrio escória-banho. Ela também é importante no desempenho dos refratários do forno, que são sensíveis a qualquer alteração efetuada tanto em suas propriedades físicas quanto químicas. Portanto, um bom conhecimento dos fundamentos de formação da escória é muito útil na análise do processo (FALCONI, 1980).

A escória do forno elétrico a arco é composta basicamente por óxidos que possuem origens distintas:

- | | | |
|---|---|--|
| SiO_2
a) MnO
FeO | } | Provém principalmente da oxidação dos elementos do banho; |
| b) CaO | - | Provém da cal calcítica, dolomítica ou refratários; |
| c) MgO | - | Pode ter origem na cal calcítica, dolomítica ou refratários; |
| d) Al_2O_3 | - | Oxidação do Al do banho. |

Para Àvila (2011), a taxa de corrosão dos refratários dos fornos elétricos a arco é fortemente influenciada pela diferença de concentração de MgO na escória e por seu limite de solubilidade. Sendo assim, a diferença de concentração é um parâmetro crucial para a avaliação do potencial de corrosão de uma escória para um determinado revestimento refratário.

Conforme Ferreira (2010), o segredo para uma escória ideal, do ponto de vista do desgaste de refratários, é encontrado quando existe o equilíbrio entre os óxidos refratários e óxidos fundentes. O balanço entre esses, irá gerar uma escória compatível com a qualidade dos revestimentos refratários empregados. A complexidade em encontrar o balanço entre os óxidos fundentes, é que uns são mais fundentes que outros, apresentando assim diferentes efeitos na solubilidade do CaO e MgO presentes na escória.

Em escórias de fornos elétricos, os óxidos refratários comumente encontrados são o CaO e MgO ; já os óxidos fundentes são o SiO_2 , o Al_2O_3 , o MnO e os óxidos de ferro.

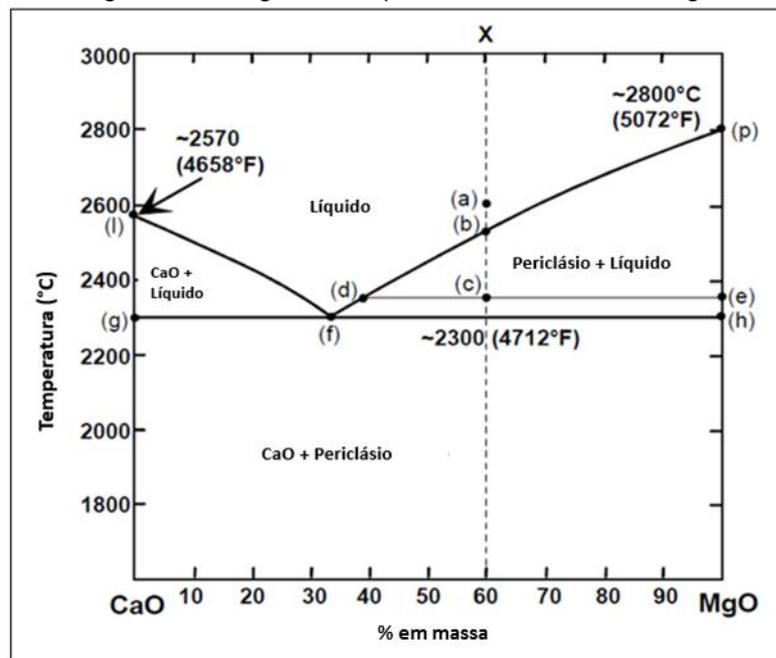
O balanço entre os óxidos é comumente expresso em termos de basicidade, que é a relação entre os óxidos refratários e os óxidos fundentes.

De acordo com Pretorius (1996), a escória “cremosa” é a ideal para a proteção dos refratários e para atender os requisitos metalúrgicos de fabricação do aço.

A interação entre os óxidos da escória e os refratários pode ser compreendida utilizando-se diagramas de fases.

Inicialmente pode-se estudar o diagrama binário simplificado CaO-MgO. No diagrama da Figura 17, observa-se que tanto o CaO quanto o MgO puros possuem elevadas temperaturas de fusão (CaO ~ 2570°C e MgO ~ 2800°C). A interação entre os dois óxidos gera uma diminuição do ponto de fusão da mistura, tendo como ponto de fusão mais baixo, o ponto eutético (f), formado quando a composição possui aproximadamente 34% de MgO e 66% de CaO a uma temperatura de 2300°C.

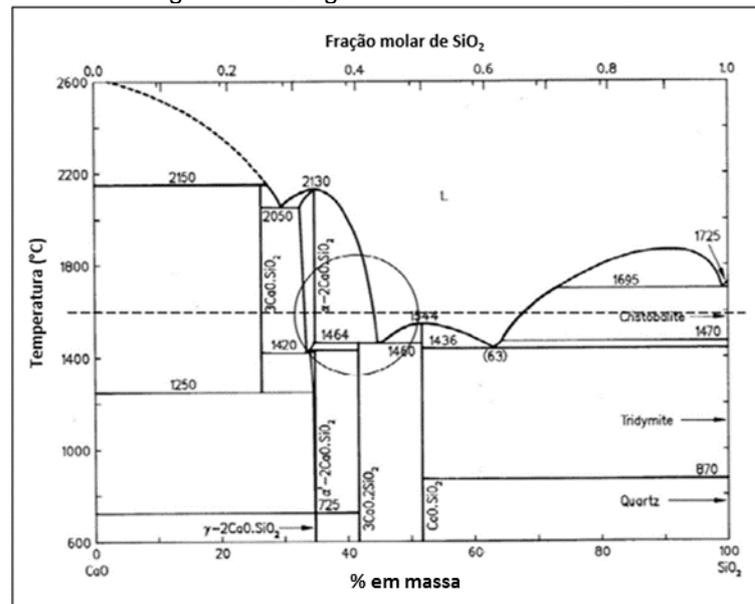
Figura 17 - Diagrama simplificado de fase CaO - MgO



Fonte: PRETORIUS, 1996.

Após essa breve análise, pode-se concluir que, mesmo existindo um ponto eutético entre os dois componentes, a formação de fase líquida não é possível em temperaturas de produção do aço, fato que demonstra a elevada capacidade refratária desses óxidos.

Outro importante diagrama binário a ser estudado é o diagrama CaO – SiO₂, representado na Figura 18.

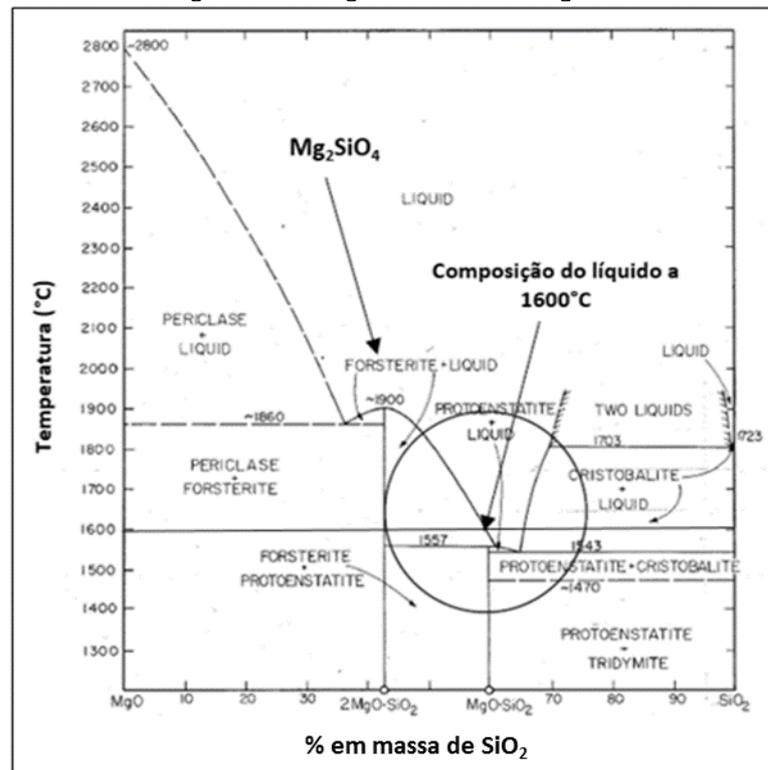
Figura 18 - Diagrama de fase CaO - SiO₂

Fonte: PRETORIUS, 1996.

Para o autor dos diagramas acima (PRETORIUS, 1996), pode-se fazer algumas considerações bastante importantes sobre o diagrama de fase CaO – SiO₂ da Figura 18.

- A SiO₂ é um bom fundente para o CaO e pode-se obter escórias líquidas de CaO – SiO₂ em temperaturas de produção do aço;
- A composição do líquido saturado em CaO a 1600°C é 56% de CaO e 44% de SiO₂;
- A temperatura sólidos desse líquido é de aproximadamente 1462°C.

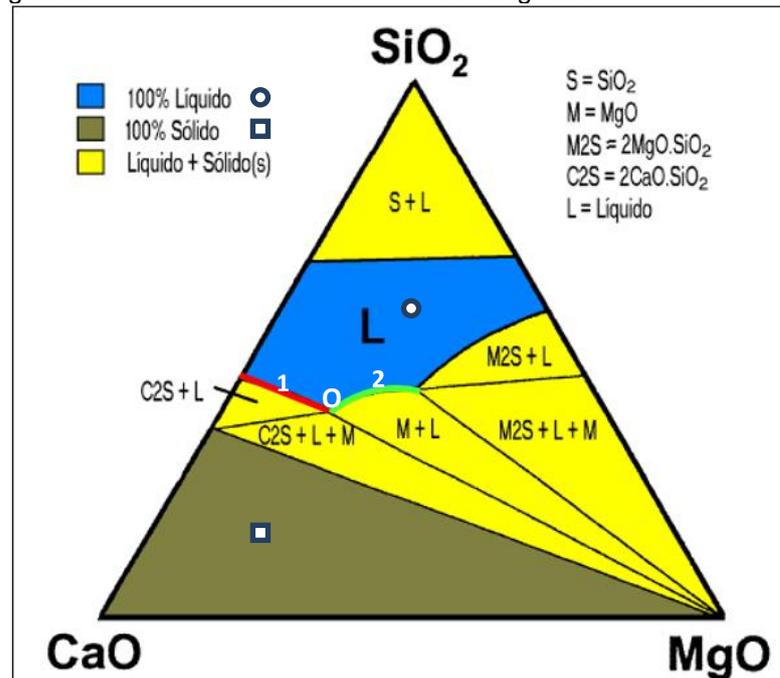
Outra importante interação entre óxidos a ser analisada é mostrada no diagrama binário MgO – SiO₂ (Figura 19).

Figura 19 - Diagrama de fases MgO - SiO₂

Fonte: PRETORIUS, 1996.

Uma característica facilmente observada nesse diagrama é a elevada solubilidade do MgO (42%) em uma escória de sílica pura a 1600 °C. Em geral, escórias de aciaria contém quantidades significativas de CaO, o que proporciona uma diminuição da solubilidade do MgO na escória.

Para avaliar melhor o efeito fluidificante da sílica em MgO e CaO, pode-se utilizar o diagrama ternário SiO₂ – CaO – MgO. Como a maioria das operações de produção de aço é realizada a 1600°C, é conveniente analisar a secção isotérmica do diagrama na temperatura citada. No diagrama a seguir (Figura 20), pode-se identificar uma área sólida que não possui contato com o líquido puro, assim como uma área completamente líquida, além das áreas de cristalização primária e secundária.

Figura 20 - Corte isotérmico a 1600°C no diagrama CaO - SiO₂ - MgO

Fonte: PRETORIUS, 1996.

Conforme Ferreira (2010), a linha na cor vermelha (1) delimita o campo de saturação do CaO. Uma escória no campo líquido, quando enriquecida com CaO, irá apresentar uma fração líquida e uma fração sólida de Ca₂SiO₄, ao cruzar por essa linha. Nesse campo, existe uma saturação simples em CaO e essas escórias possuem boa compatibilidade com refratários dolomíticos.

A linha na cor verde (2) delimita o campo de saturação do MgO. Adicionando uma quantidade suficiente de MgO, a escória atinge seu limite de solubilidade, ultrapassando a linha verde (2) e entrando no campo M+L onde coexistem uma fase sólida de MgO e uma fração líquida. Essa região é definida como região de saturação simples em MgO e essas escórias são compatíveis com refratários de MgO-C.

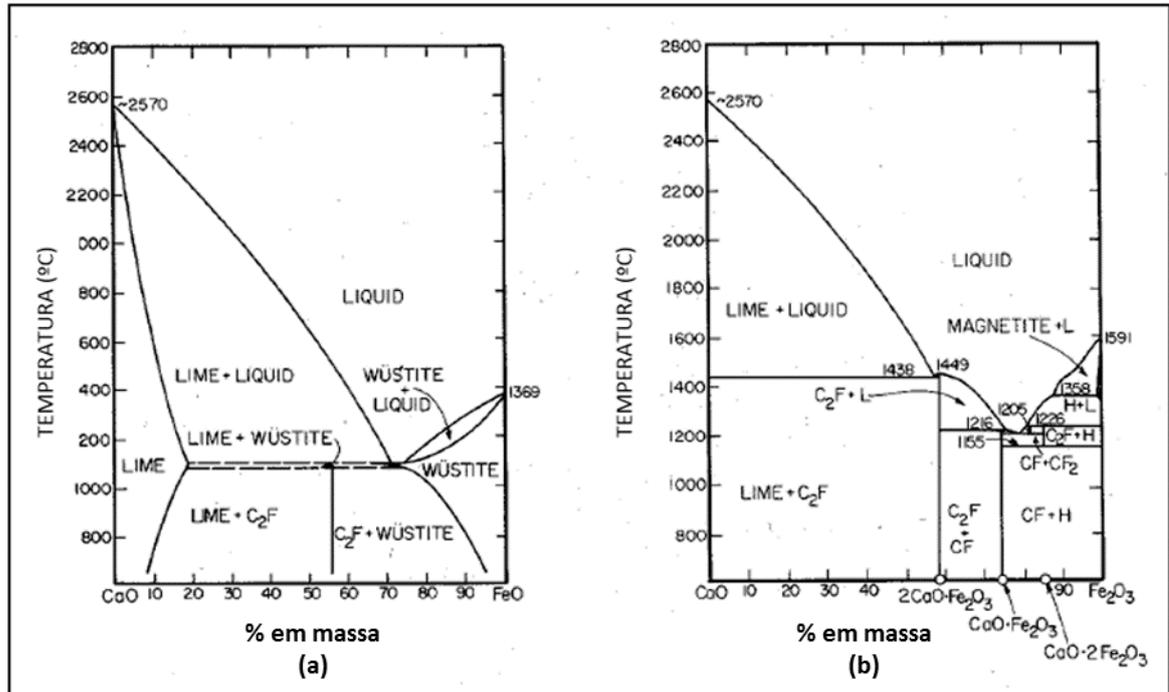
A saturação dupla (CaO e MgO) ocorre no ponto O, e as escórias com essa composição apresentam boa compatibilidade com refratários dolomíticos e magnésia carbono.

Outra importante classe de óxidos muito significativa em operações metalúrgicas são os óxidos de ferro (FeO, F₃O₄ e F₂O₃).

Os óxidos de ferro (FeO e F₂O₃) são excelentes fundentes do CaO, como pode-se observar nos eutéticos de baixa temperatura apresentados nos diagramas da Figura 21. A solubilidade do CaO nos óxidos de ferro é elevada, cerca de 50%

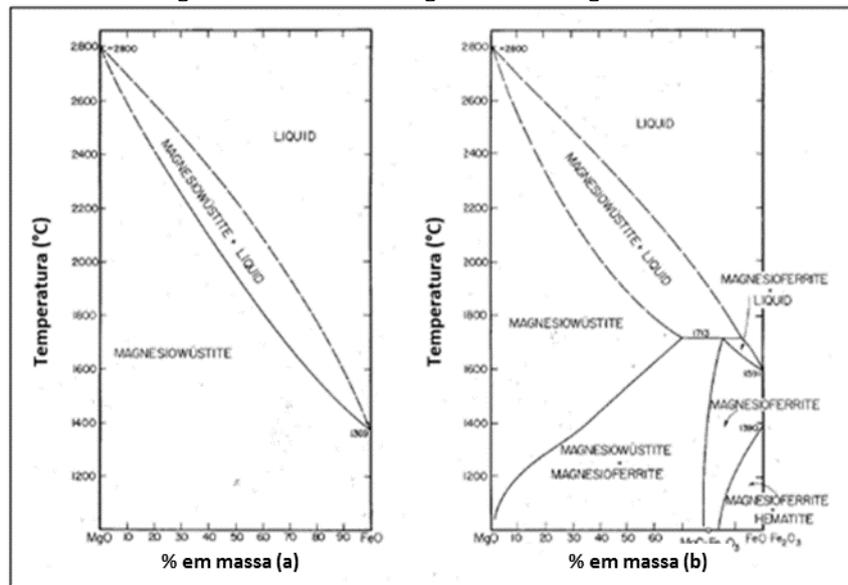
de CaO em FeO e 55% de CaO em F_2O_3 , a $1600^{\circ}C$. A formação desses líquidos de baixo ponto de fusão e a grande solubilidade do CaO são muito vulneráveis a escórias que contenham óxidos de ferro (PRETORIUS, 1996).

Figura 21 - Sistemas CaO - FeO e CaO - F_2O_3



Fonte: PRETORIUS, 1996.

A interação dos óxidos de ferro com o MgO é muito importante (Figura 22). Os raios dos íons Mg^{2+} e Fe^{2+} são muito semelhantes e, por esse motivo, o MgO e FeO formam uma solução sólida em toda a faixa de composição (abaixo dos $1400^{\circ}C$).

Figura 22- Sistemas MgO - FeO e MgO - Fe₂O₃

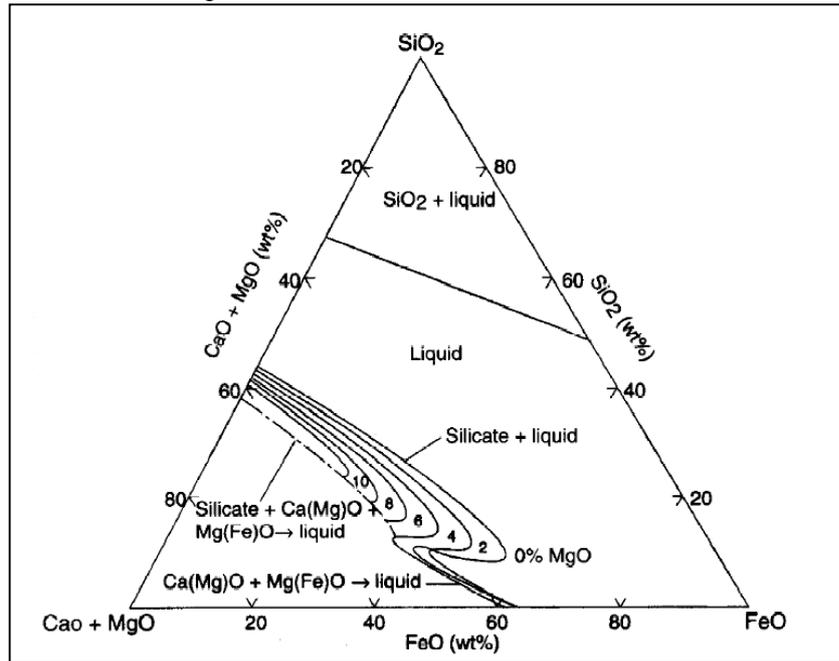
Fonte: (Pretorius, 1996)

Conforme se pode observar no diagrama, a 1600 °C, o MgO pode suportar até 68% de Fe₂O₃ antes de formar uma fase líquida. Isso tem uma implicação muito importante em termos de desgaste de refratários e mostra por que refratários de magnésia carbono possuem um excelente desempenho quando em contato com escórias ricas em óxidos de ferro (SEGADÃES, 1997).

Por fim, no diagrama ternário da Figura 23, pode-se analisar um diagrama que contém os principais óxidos que compõem as escórias de um forno elétrico a arco a 1600°C. É muito importante salientar a importância do MgO e a necessidade de sua saturação, para minimizar o ataque da escória ao revestimento refratários dos FEA.

Na Figura 23 apresenta-se o efeito do MgO sobre a solubilidade dos silicatos de cálcio e óxidos de cálcio para o sistema CaO-MgO-FeO- SiO₂ em equilíbrio com o ferro metálico a 1600°C. Nota-se que, aumentando os percentuais de MgO na escória, o campo de C₂S diminui.

Figura 23 - Efeito do MgO sobre as isotermas de solubilidade a 1600°C no sistema CaO - MgO - FeO - SiO₂ em contato com ferro metálico



Fonte: PRETORIUS, 1996.

Vale salientar que os diagramas estudados representam situações de equilíbrio indicando um provável comportamento das escórias, e que, em condições industriais, podem ocorrer casos que se afastam dessas condições básicas, sendo necessário utilizar outros recursos metalúrgicos que complementem a termodinâmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais estudados, assim como sua aplicação. Além disso, será realizado o detalhamento dos métodos utilizados para a caracterização dos materiais.

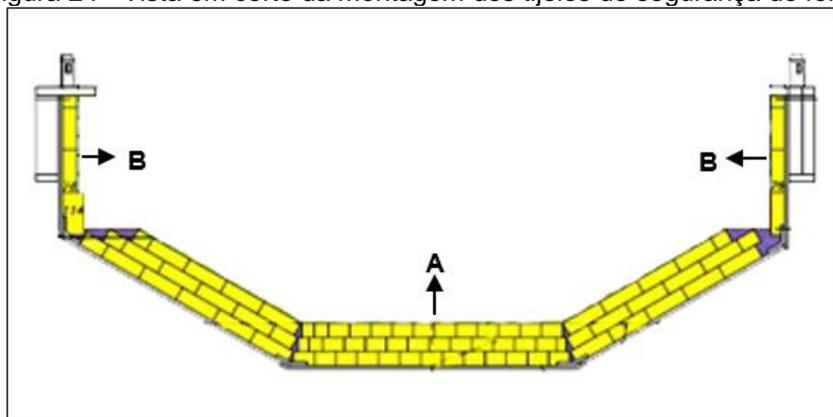
3.1 DADOS TÉCNICOS DO FORNO EM ESTUDO

O estudo foi realizado em um forno elétrico a arco com diâmetro da carcaça de 4,45 m, volume bruto de 19,74 m³ e peso médio de aço vazado de 21 t. O forno possui dois injetores multifuncionais de parede (O₂ e gás natural) com vazão de projeto de 950 Nm³/h, além de duas lanças de oxigênio na porta de escória, com vazões de 700 Nm³/h por lança e um injetor de coque com vazão de 6 a 18 kg/min.

3.1.1 Montagem Refratária do Forno Elétrico a Arco

A construção refratária do forno elétrico inicia-se pela montagem dos tijolos permanentes, também conhecidos como refratários de segurança. Esses refratários não possuem contato direto com aço líquido ou escória sendo solicitados somente em caso de falha dos refratários de trabalho. Em geral, para essa finalidade, são utilizados tijolos magnesianos. Nos fornos da Gerdau Riograndense, são utilizadas três camadas (fiadas) de tijolos de segurança abaixo da soleira (região A) e uma camada nas laterais de toda a carcaça (região B).

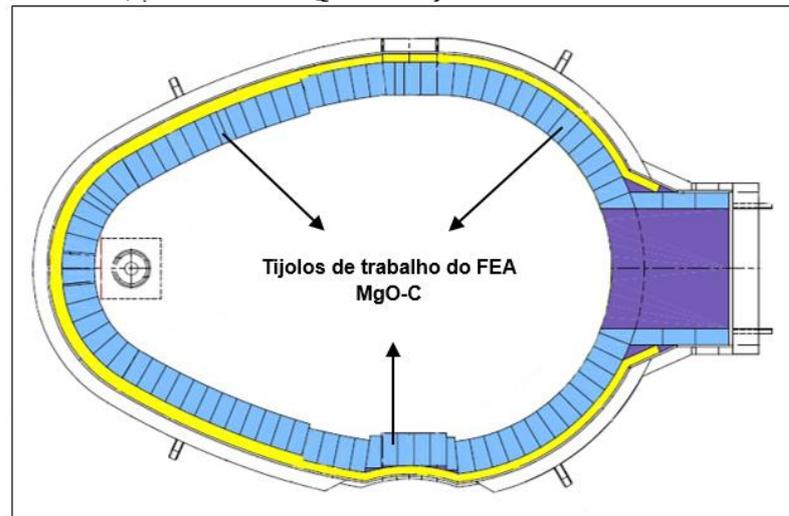
Figura 24 - Vista em corte da montagem dos tijolos de segurança do forno



Fonte: O Autor, 2015.

Após a instalação dos tijolos permanentes, são colocados os tijolos de trabalho. Esses tijolos são instalados em toda a circunferência e na porta de escória do forno elétrico a arco. Para essa montagem, são utilizados tijolos com diferentes angulações, o que torna possível realizar a montagem em todo o contorno da carcaça do forno e obter o travamento das paredes sem a utilização de concreto.

Figura 25 - Vista superior da montagem dos tijolos de trabalho do forno elétrico a arco



Fonte: O Autor, 2015.

Na montagem das paredes e da porta de escória do forno são utilizados tijolos de magnésia-carbono, os quais devem suportar: o ataque químico da escória e do banho líquido, gradientes de temperatura e a atmosfera oxidante do forno.

Figura 26 - Montagem dos tijolos do forno elétrico a arco



Fonte: O Autor, 2015.

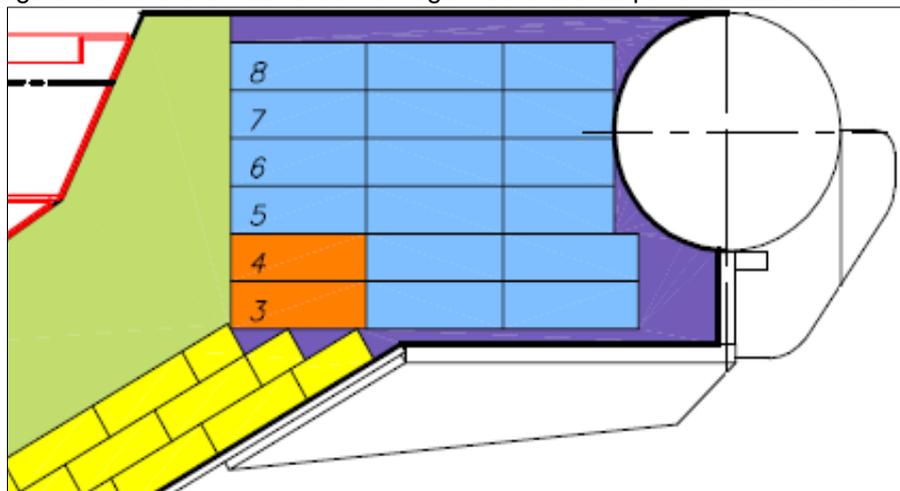
A porta de escória do FEA é montada em forma de bloco por se tratar de uma região de grande solicitação mecânica, devido à necessidade de limpeza periódica para a retirada da escória aderida. Além disso, a região tem grande interação química com a escória que é retirada do forno durante a operação. As Figura 27 e 28 representam, respectivamente, em imagem e corte, a porta de escória do FEA.

Figura 27 - Imagem da porta de escória do forno



Fonte: O Autor, 2015.

Figura 28 – Vista em corte da montagem do bloco da porta de escória do FEA



Fonte: O Autor, 2015.

Após a montagem dos tijolos de trabalho, inicia-se a instalação da massa refratária (massa refratária de pega a quente, resistente a erosão e ataque de

escória). Para a acomodação da massa na carcaça do forno são utilizadas quatro formas metálicas encaixadas uma sobre a outra, conforme os seguintes passos:

- a) Colocação da forma metálica no interior da carcaça do forno;
- b) Aplicação da massa refratária no entorno da forma;
- c) Vibração da massa para eliminar espaços vazios;
- d) Compactação da camada de massa.

As etapas descritas acima, conforme pode ser visualizado na Figura 29, são repetidas quatro vezes, até que a altura de massa compactada seja igual à altura dos tijolos de trabalho. As formas metálicas serão removidas apenas alguns instantes antes do início da operação do forno.

Figura 29 - Formas para acomodação da massa na carcaça do forno



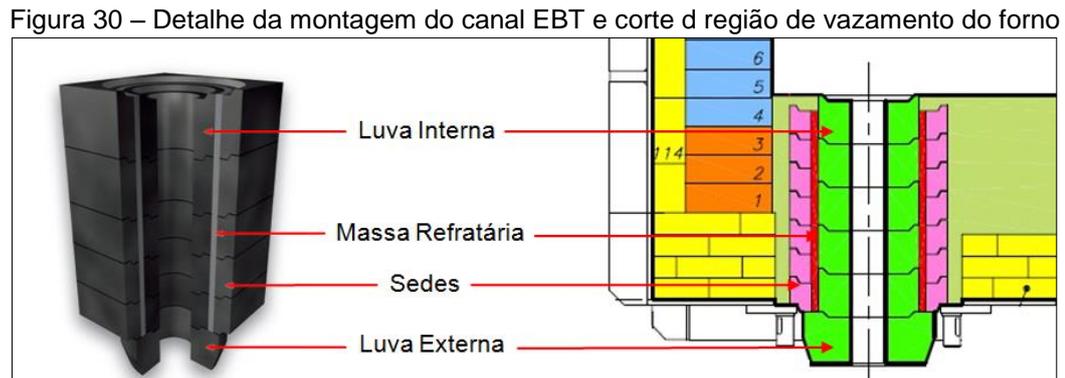
Fonte: O Autor, 2015.

Outro importante conjunto refratário instalado no FEA é o canal EBT (*Eccentric Bottom Tapping*).

Antes da colocação do canal EBT na carcaça do forno são instaladas as sedes, peças refratárias de MgO-C de formato quadrado com orifício cilíndrico. As sedes são posicionadas uma sobre a outra com encaixes do tipo macho/fêmea. O conjunto de sedes tem a função de acomodar o canal EBT em seu interior, facilitando a sua substituição sempre que necessário. As sedes são substituídas ao fim da campanha da carcaça, somente em caso de necessidade.

Após a instalação das sedes é inserido o canal EBT, conjunto refratário composto por cinco peças montadas uma sobre a outra com um encaixe tipo macho/fêmea. O conjunto do canal EBT é inserido no orifício das sedes, sendo que

somente seu último segmento, conhecido comumente como luva externa, fica na parte de fora do FEA. O espaço vazio entre as sedes e o canal EBT é preenchido com massa refratária seca para evitar a infiltração de aço durante a campanha. A montagem detalhada das sedes e do canal EBT pode ser observada com mais detalhes na Figura 30.



Fonte: O Autor, 2015.

A qualidade e o desgaste do canal EBT tem grande impacto na operação do forno, tendo influência direta na quantidade de escória transferida do forno para a panela, impactando no consumo de ligas e refratários do restante do processo. Além disso, paradas de processo não programadas para a substituição do canal EBT geram aumento do *Power Off* (tempo de forno desligado) e diminuição da produtividade da aciaria.

3.2 REFRATÁRIOS ESTUDADOS

Nos itens abaixo segue uma breve descrição dos refratários estudados neste trabalho.

3.2.1 Tijolos MgO-C

Foram estudados três exemplares de tijolos MgO-C empregados como tijolos de trabalho em fornos elétricos a arco, denominados tijolos A, B e C.

Segue uma breve descrição dos materiais segundo os fornecedores:

- a) Tijolo A - Tijolo refratário de magnésia-carbono, à base de magnésia sinterizada e grafita lamelar, com adição de antioxidantes, ligado à resina, curado.
- b) Tijolo B - Tijolo de magnésia carbono, a base de magnésia fundida, antioxidantes, grafite, ligado a resina.
- c) Tijolo C - Tijolo refratário a base de magnésia sinterizada e eletrofundida, quimicamente ligado, com elevada resistência à flexão a quente, erosão e corrosão por escórias.

As análises foram realizadas por meio das técnicas de análise por imagem (lupa); caracterização microestrutural (MEV/EDS), difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica e infravermelho (FTIR). Além disso, o desempenho dos três materiais foi testado em operação em forno elétrico a arco.

3.2.2 Massas Refratárias de Cura a Quente

Cinco amostras de massas refratárias foram estudadas, dentre elas, três massas refratárias de soleira (X, Y e Z) – Figura 31, e duas massas de reparo a quente (J e K) – Figura 32.

Segundo os fabricantes as massas são definidas como:

- a) Massa X - massa de magnésia sinterizada, seca, de pega a quente com elevado teor de CaO, resistente à erosão por metais e escórias básicas. Granulometria de 0 a 10 mm.
- b) Massa Y - massa refratária à base de magnésia sinterizada, seca, de pega à quente, com elevado teor de CaO, resistente à erosão por metais e escórias básicas. Granulometria de 0 a 5,60 mm.
- c) Massa Z - massa de soleira de magnésia sinterizada com aplicação principal em fornos elétricos a arco. Granulometria de 0 a 5 mm.
- d) Massa J – massa de reparo a quente de magnésia sinterizada para aplicação em fornos elétricos a arco. Granulometria de 0 a 5 mm.
- e) Massa K – massa refratária à base de magnésia sinterizada, seca, de pega à quente, com elevado teor de CaO, resistente a erosão por metais e escórias básicas. Granulometria de 0 a 5,6 mm.

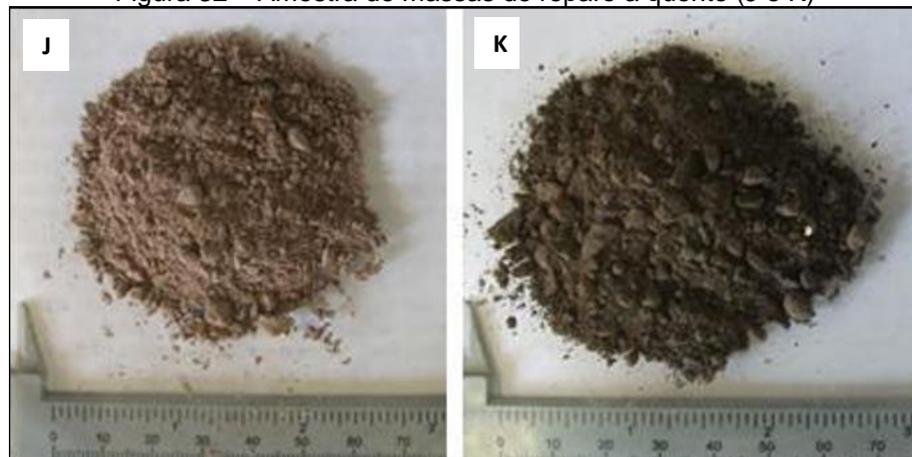
As análises desenvolvidas no presente trabalho tiveram por objetivo a identificação dos componentes, fases e distribuição granulométrica tanto das massas de soleira como das massas de reparo a quente. Além disso, procurou-se comparar as massas em relação à fusibilidade das mesmas.

Figura 31 – Amostras de massas refratárias de soleira (X, Y e Z)



Fonte: o Autor, 2014.

Figura 32 – Amostra de massas de reparo a quente (J e K)

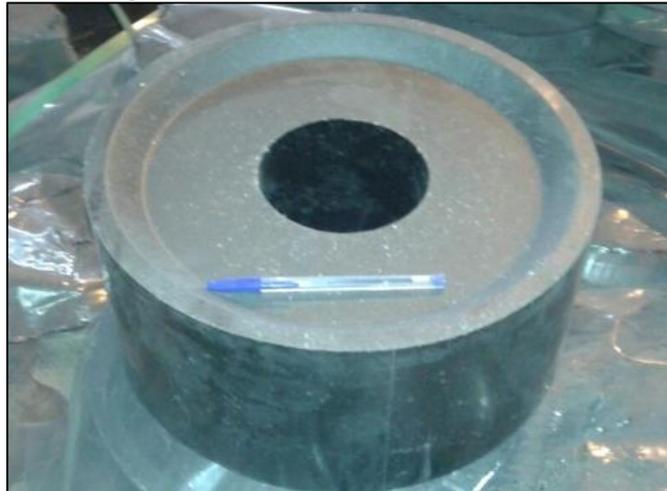


Fonte: o Autor, 2014.

3.2.3 Conjunto EBT

Foram analisadas, em laboratório, três amostras de luvas refratárias utilizadas em canal EBT, cuja representação pode ser visualizada na Figura 33.

Figura 33 - Luva refratária do canal EBT



Fonte: O Autor, 2015.

A descrição dos materiais, assim como a composição química das amostras, é mostrada abaixo conforme dados fornecidos pelos fabricantes.

- a) EBT P - refratário de magnésia-carbono, com 13% de carbono, à base de grafita lamelar e magnésia eletrofundida, com adição de antioxidante, ligado a resina e curado. De elevadas resistências a oxidação, flexão a quente e ataque de escórias.
- b) EBT Q - refratário de magnésia-carbono, à base de magnésia sinterizada eletrofundida, grafita de alta pureza com metais e antioxidantes especiais, ligado à resina e curado. De elevadas resistências à oxidação, flexão à quente e ataque de escórias oxidadas.
- c) EBT R – refratário de magnésia fundida e ligado a carbono (grafita), curado e impregnado.

3.3 ANÁLISES REALIZADAS

As análises realizadas buscaram a caracterização dos refratários, passando por ensaios em laboratório até o teste dos mesmos em escala industrial, objetivando o completo conhecimento dos materiais estudados.

3.3.1 Análise Granulométrica

As análises granulométricas foram realizadas com um sistema de 6 peneiras ABNT com aberturas de 4,75 a 0,25mm. Após o peneiramento o material passante e retido em cada peneira foi pesado, gerando-se assim o perfil granulométrico das amostras.

3.3.2 MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

Para a análise dos tijolos de MgO-C e das luvas refratárias do canal EBT, utilizou-se a tecnologia de microscopia eletrônica de varredura. O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV (Hitachi, TM3000), com um equipamento acessório para espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS- Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) da marca Oxford Instruments, modelo SwiftED3000.

Nesta análise, as amostras foram colocadas sobre um suporte de alumínio previamente preparado com uma fita adesiva de carbono. As amostras foram obtidas por corte a seco e o polimento foi igualmente realizado a seco, com lixas de grana crescente (de 100 a 1200).

O princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas, e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. O sinal da imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor permitindo a observação (DEDAVID, 2007).

O EDS (*energy dispersive x-ray detector*, EDX ou EDS) é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos, e os íons constituintes, são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios X. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo

possuem energias distintas, é possível, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local (MARQUES, 2012).

A análise da composição química, através da técnica de análise via microsonda por energia dispersa (EDS), foi realizada com o objetivo de determinar possíveis contaminantes, que podem reagir com outros elementos diminuindo a resistência mecânica a quente do refratário.

3.3.3 DRX (Análise de Difração por Raios X)

A avaliação de fases presentes, nas amostras, foi realizada a partir de análise em difratômetro Phillips modelo X'Pert MPD, com o auxílio do software X'Pert High Score. Para a realização da análise, as amostras foram cominuídas até passarem totalmente pela peneira de 325 Mesh. Após isso, o material foi seco em estufa a 110°C por 90 minutos. Em seguida, a amostra foi compactada sobre um suporte de alumínio e inserida no difratômetro. Por fim, os difratogramas das amostras foram comparados aos difratogramas de amostras de referência já catalogados.

3.3.4 Análise Termogravimétrica (TG e DTG)

A análise termogravimétrica permite deduzir a perda de massa da amostra pelas curvas TG e DTG (diferencial térmica), e medir as variações térmicas das transformações ou mudanças de fase da amostra. As análises dos tijolos foram realizadas em termobalança da marca Mettler Toledo, modelo TG/SDTA 851e. Neste equipamento, a amostra é suspensa em uma balança e seu peso é monitorado durante o aquecimento ou resfriamento controlado, ou sob condições isotérmicas (REED, 1995).

3.3.5 Análise de Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise química das massas refratárias foi calculada com base nos óxidos majoritários, determinados por fluorescência de raios X (FRX), utilizando-se espectrômetro Shimadzu XRF1800 com fonte de radiação de Rh e potência de 4kW, operando em 40 kV e 80 mA. A técnica de análise consiste em criar pastilhas a partir de 3g de amostra e 3g de ligante (ácido bórico), compactados a 20 MPa de pressão.

Através da fluorescência de raios-X pode-se identificar quase todos os elementos da tabela periódica, com exceção do H, He e Li além do Be, B, C, N e O, presentes em pequenas concentrações. Essa limitação deve-se ao fato de que, elementos com baixo peso molecular, exigem uma quantidade de energia maior que a máxima energia cedida pelo tubo de raios-X para desestabilizar o átomo.

3.3.6 Análise por Infravermelho (FTRI)

Para a análise de infravermelho, utilizou-se um espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR – IRAffinity, Shimadzu), com o objetivo de identificar o tipo de resina utilizada como ligante nos tijolos refratários.

3.3.7 Ensaio de Sinterização

Os ensaios de sinterização foram realizados em forno elétrico Jung, sem controle de atmosfera e com taxa de aquecimento de 150°C/h. Após atingirem a temperatura de 1400°C, as amostras foram mantidas a essa temperatura por uma hora. Na etapa de sinterização das massas foi utilizada somente a fração passante na malha 48 (abertura de 0,297mm), pois é a fração mais fina que forma a fase ligante (matriz) que conecta as partículas maiores (agregados). A finalidade do ensaio de sinterização é verificar a retração das amostras de massas refratárias quando submetidas a aquecimento até 1400°C.

3.4 TESTE DOS REFRATÁRIOS EM OPERAÇÃO

Após a caracterização, foram selecionados dois modelos de cada material refratário para teste em forno elétrico a arco. Para o teste, foram criadas duas configurações de montagem, com refratários distintos conforme demonstrado nas Figuras 34 e 35.

A configuração A foi composta pelos tijolos A, canal EBT P, massa de soleira X e massa de reparo K.

Figura 34 - Materiais refratários utilizados no forno – Configuração A



Fonte: o Autor, 2016.

Já na configuração B, foram utilizados os tijolos B, canal EBT R, massa de soleira Z e massa de reparo J.

Figura 35 - Materiais refratários utilizados no forno - Configuração B



Fonte: o Autor, 2016.

Os testes foram realizados em 12 campanhas intercaladas entre a configuração A e B, conforme mostrado no esquema da Figura 36.

Figura 36 - Esquema de realização do teste



Fonte: o Autor, 2016.

Todas as campanhas operaram por períodos de 21 dias com um número médio de 27 corridas por dia, com exceção da 12ª campanha que operou apenas 14 dias devido a parada da aciaria.

O objetivo dos testes foi avaliar o desempenho dos diferentes materiais em condições reais de operação, mensurando o consumo específico de cada classe de material. Além disso, foram realizadas 12 campanhas para minimizar o impacto de problemas pontuais que pudessem influenciar nos resultados. Em todas as

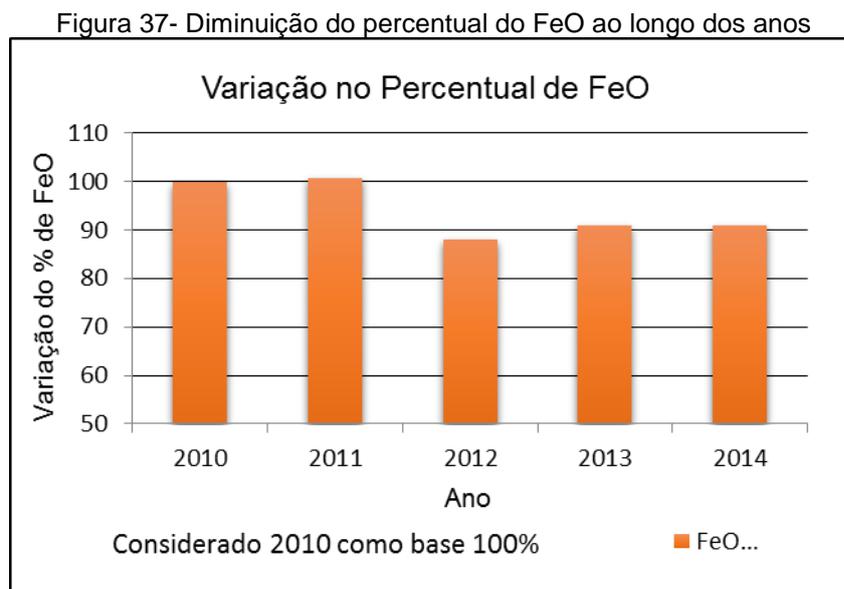
campanhas foram mensurados o consumo e o custo específico dos materiais, utilizados para fins de obter-se uma comparação precisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos ao longo de todo o trabalho, desde a análise microestrutural dos materiais, até os testes em escala industrial.

4.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO DA ACIARIA

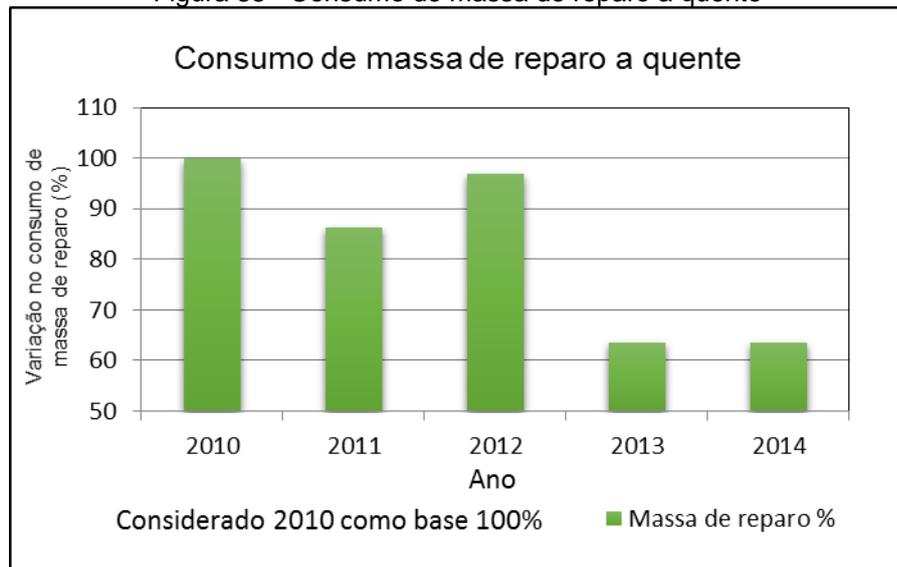
Com base na avaliação detalhada do processo da aciaria em que foi realizado o estudo, identificou-se uma grande estabilidade na composição das escórias do forno elétrico a arco ao longo dos últimos cinco anos. Além disso, pode-se identificar, claramente, uma diminuição do percentual de FeO na escória conforme é possível visualizar na Figura 37.



Fonte: O Autor, 2014.

No gráfico, pode-se verificar uma diminuição de aproximadamente 10% no percentual de FeO da escória do forno elétrico a arco. Tal diminuição foi causada por: melhorias no controle do processo e substituição de injetores convencionais por injetores com jato supersônico coerente (COJET).

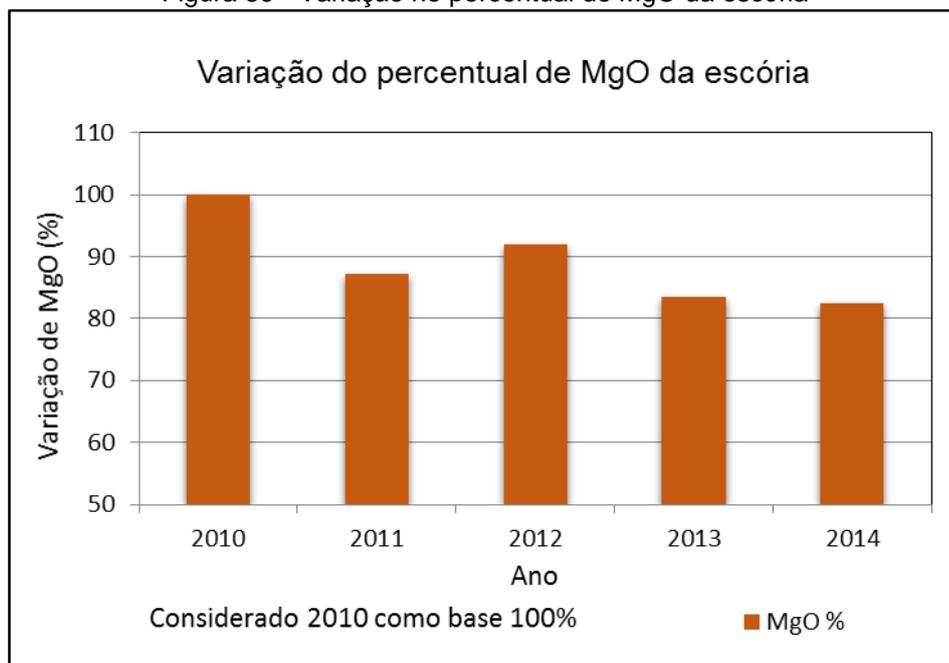
Figura 38 - Consumo de massa de reparo a quente



Fonte: O Autor, 2014.

Conforme demonstrado na Figura 38, houve uma diminuição de aproximadamente 30% no consumo de massa de reparo após o ano de 2013 em relação aos três anos anteriores. Deve-se salientar que, a diminuição do consumo de massa de reparo não tem relação com a supersaturação de MgO na escória, pois, conforme é possível verificar na Figura 39, houve uma diminuição no MgO da escória nos anos de 2013 e 2014.

Figura 39 - Variação no percentual de MgO da escória



Fonte: O Autor, 2014.

A análise do processo mencionada acima serviu como base para a seleção dos materiais a serem testados em operação, buscando a utilização de refratários de menor custo sem comprometer a segurança operacional.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS REFRAATÓRIOS

Nesta etapa do trabalho, os materiais foram caracterizados por diferentes métodos com o objetivo de conhecer melhor a composição química e a microestrutura dos refratários estudados.

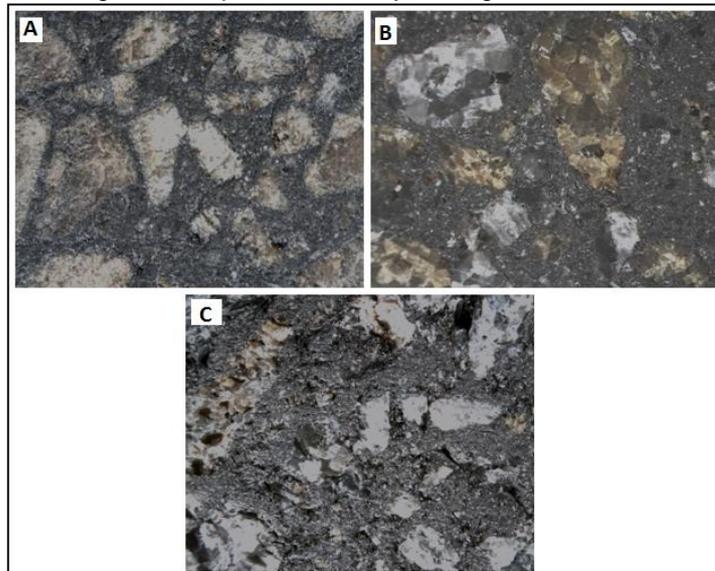
4.2.1 Caracterização dos Tijolos MgO-C

Neste tópico são apresentados os resultados das caracterizações de amostras de três tijolos MgO-C utilizados no estudo, os quais foram submetidos a análise em lupa eletrônica, microscópio eletrônico de varredura (MEV), difração de raios X e análise termogravimétrica.

4.2.1.1 Análise por Imagem (Lupa eletrônica)

Observa-se nas imagens a seguir uma visão geral da microestrutura dos tijolos com ampliação de 6x.

Figura 40 - Imagem em lupa eletrônica tijolos MgO-C das amostras A, B e C

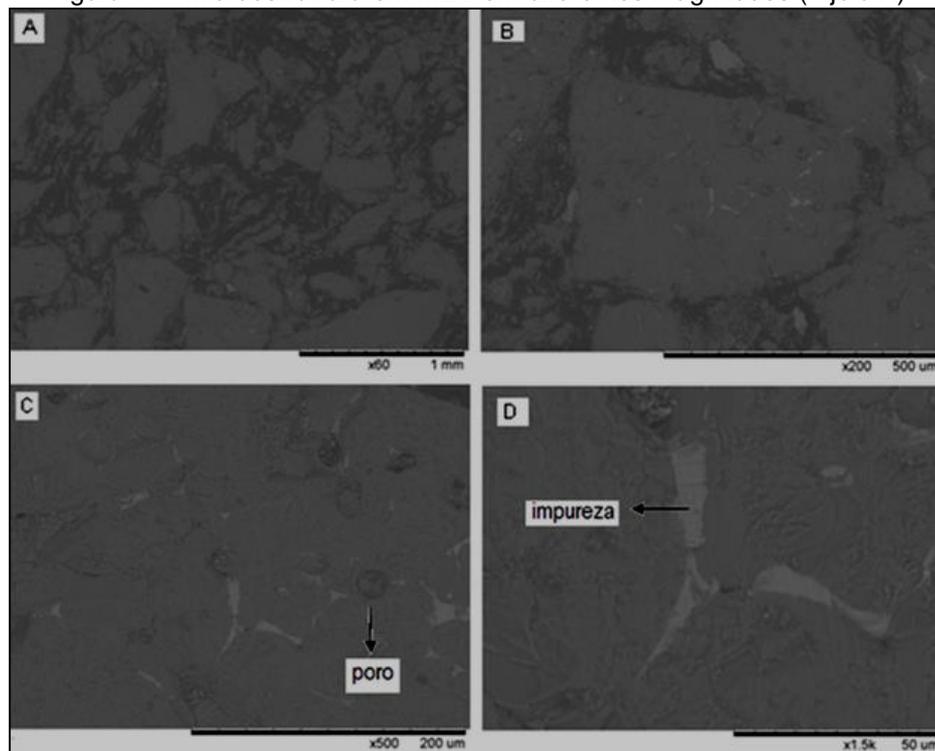


Fonte: o Autor, 2014.

Mesmo nesta análise de menor resolução, é possível se observar diferenças significativas na microestrutura das amostras. Os Tijolos A e B apresentam uma distribuição mais uniforme dos agregados na microestrutura, com agregados aparentemente de melhor qualidade, com contornos bem definidos e mais arredondados. O Tijolo C, apresenta alguns agregados com porosidade aberta, distribuídos em uma estrutura mais fragilizada, devido à preparação por corte e polimento, sendo este, o mesmo procedimento para todas as amostras. Tais dados podem ser verificados na Figura 40, abaixo.

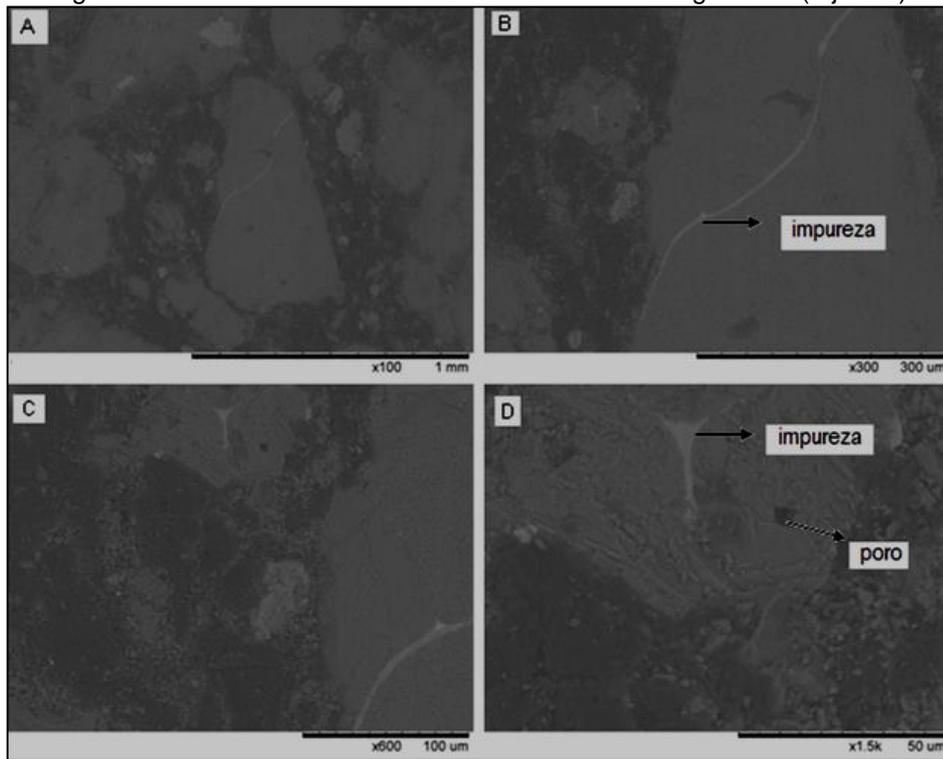
4.2.1.2 Caracterização Microestrutural (MEV/EDS)

Figura 41 - Microestruturura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo A)



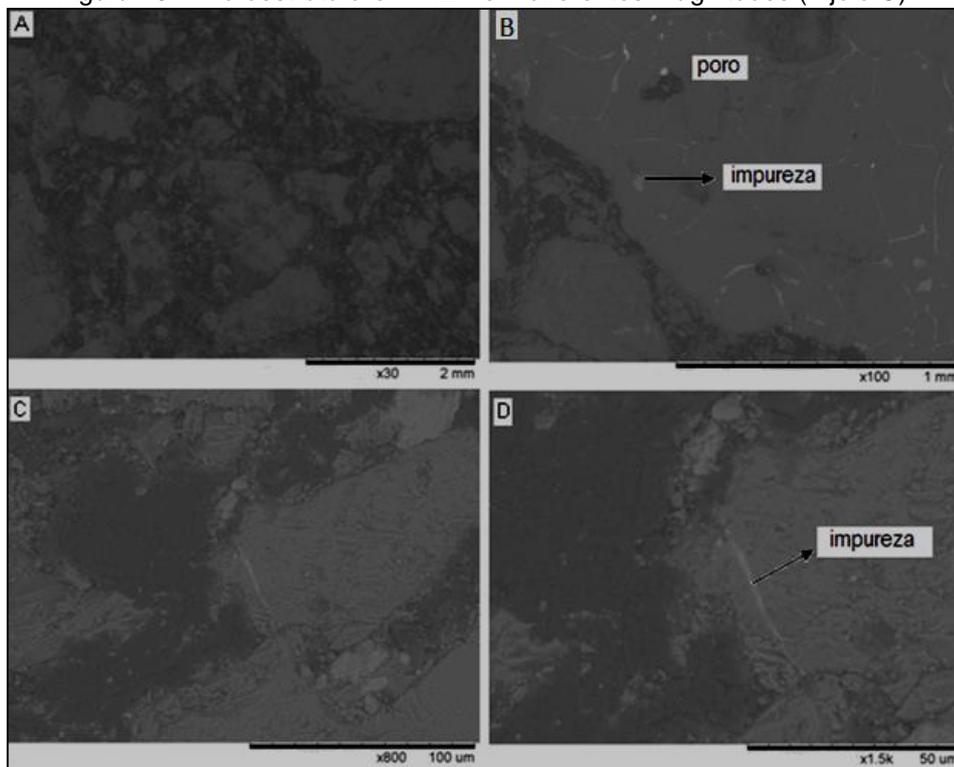
Fonte: o Autor, 2014.

Figura 42 - Microestrutura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo B)



Fonte: o Autor, 2014.

Figura 43 - Microestrutura em MEV em diferentes magnitudes (Tijolo C)

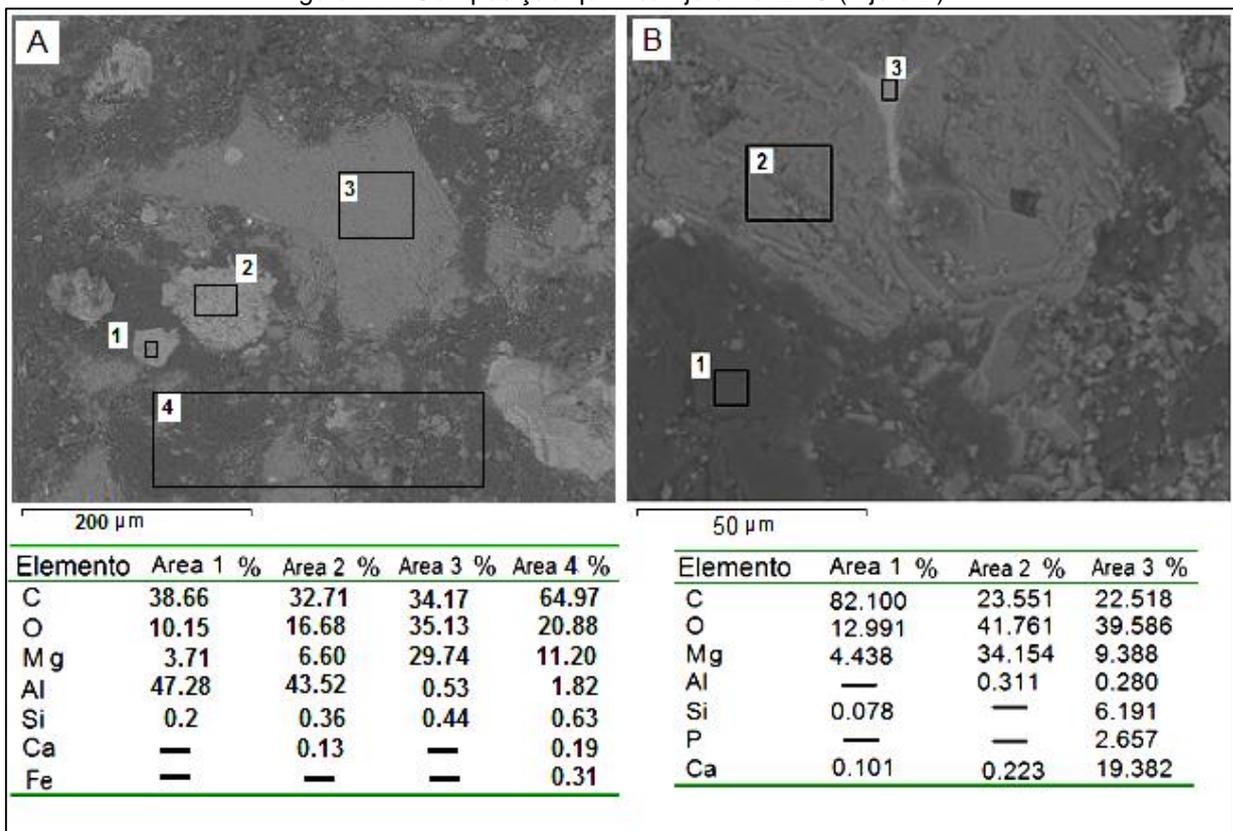


Fonte: o Autor, 2014.

Os três tijolos analisados apresentam uma boa distribuição de tamanho de partículas, com uma estrutura formada de partículas pequenas, médias e mais grosseiras (Figuras 41, 42 e 43). Isto favorece o empacotamento e o aumento da tenacidade à fratura do tijolo. Além disso, nos três materiais analisados, é possível observar a presença de agregados com porosidade e impurezas. Alguns agregados apresentam aspecto típico de grãos eletrofundidos, com as impurezas depositadas no contorno de grão.

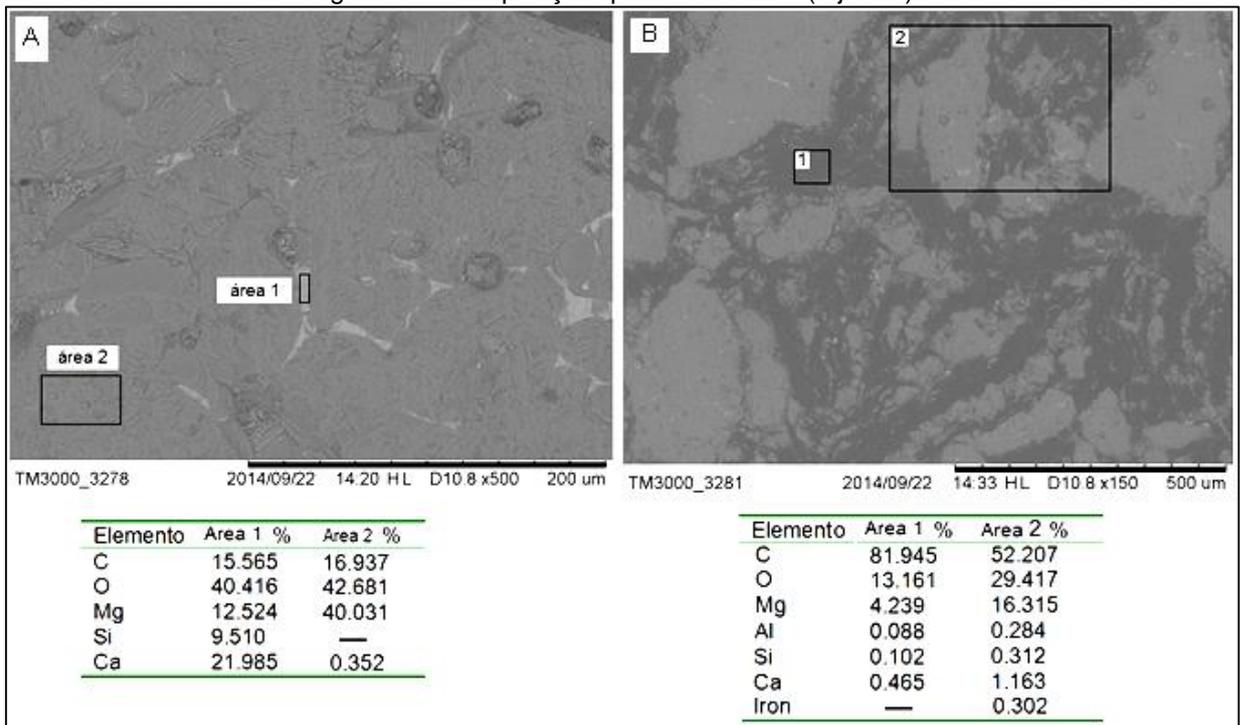
A utilização de partículas eletrofundidas contribui para uma melhora no desempenho de refratários, aumentando a vida útil dos mesmos, embora signifiquem um aumento no custo de produção. É um fator consagrado em termos de melhora da microestrutura de refratários, como demonstram diversos estudos já publicados (LEE; ZHANG, 2004).

Figura 44 - Composição química tijolo via EDS (Tijolo B)



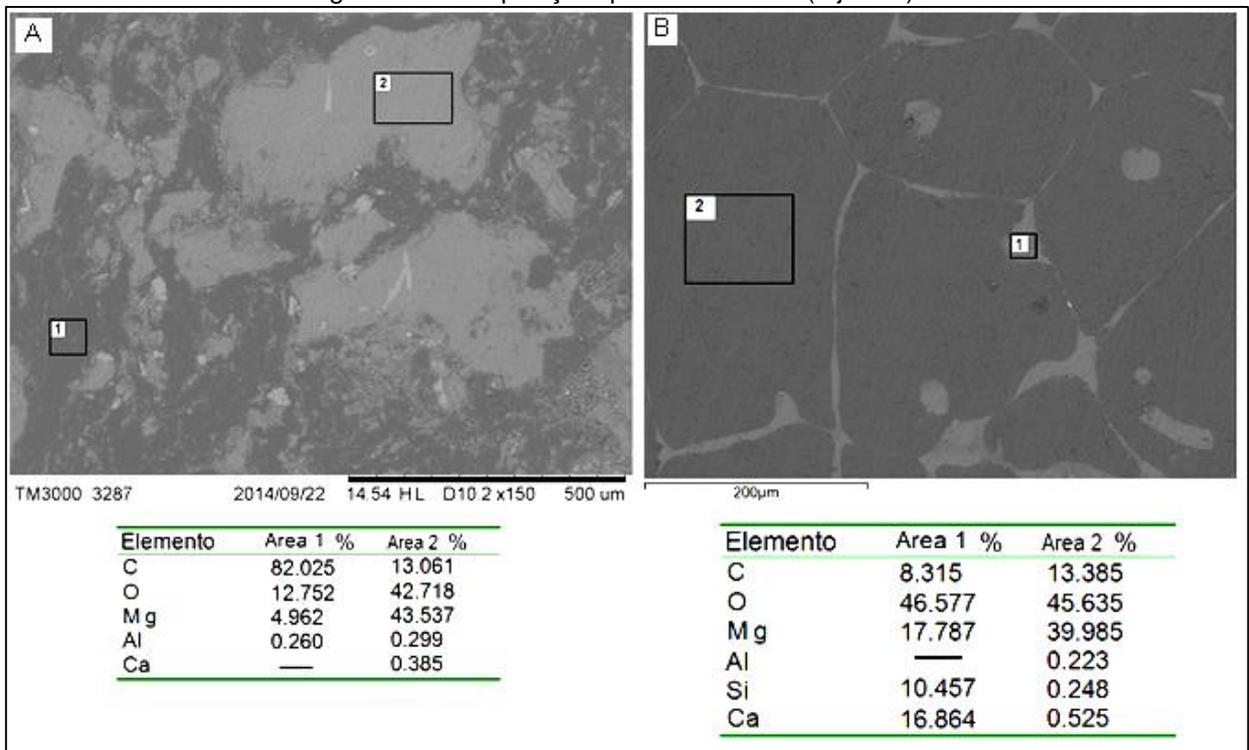
Fonte: O Autor, 2014.

Figura 45 - Composição química via EDS (Tijolo A)



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 46 - Composição química via EDS (Tijolo C)



Fonte: O Autor, 2014.

A análise da microestrutura revelou, em geral, a presença de impurezas nas partículas eletrofundidas, distribuídas ao longo do contorno de grão da

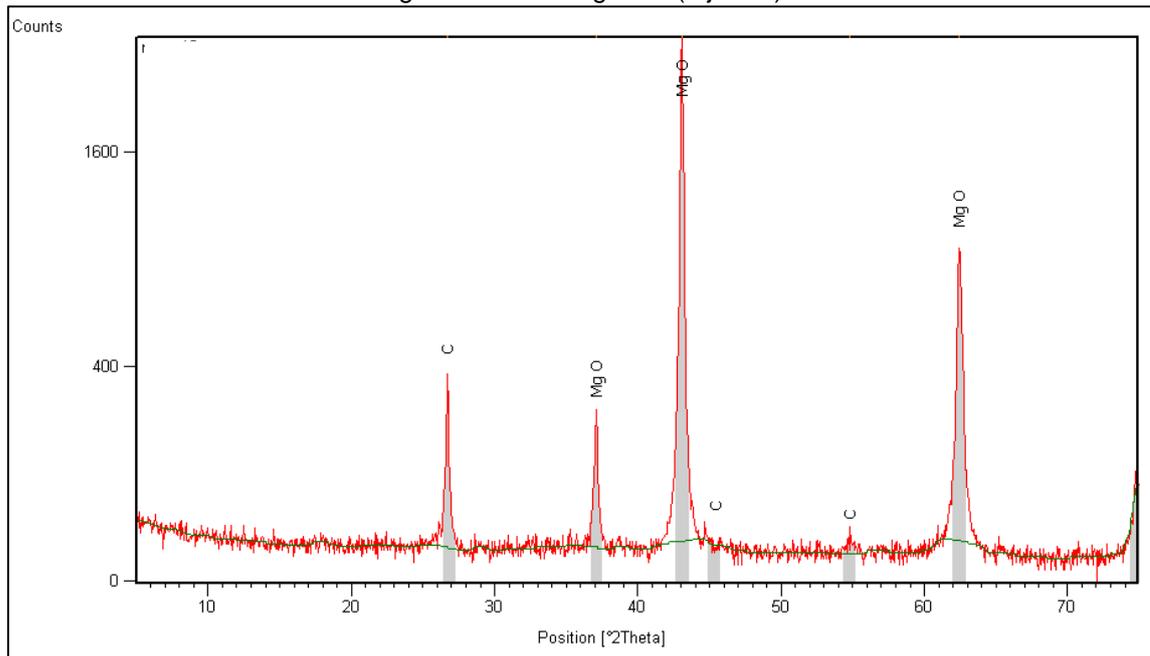
microestrutura dos três tijolos (Figuras 44, 45, 46). De acordo com a análise de EDS, as impurezas presentes nos agregados das três amostras de tijolo são ricas em Si e Ca, formando eutéticos, como silicatos de cálcio de baixa fusibilidade. Estas impurezas presentes nos agregados podem favorecer a formação de fases líquidas em altas temperaturas, mas, normalmente, não comprometem a qualidade do material refratário. Elas formam uma tonalidade mais clara dentro do agregado, sendo facilmente observáveis.

É importante destacar que, fora das regiões de eutéticos mencionadas anteriormente, as impurezas como o Si e o Al presentes nas análises via EDS, apresentam-se em teores baixos, sendo inerentes à matéria-prima. Quando estes elementos estão em maiores concentrações dentro da partícula, eles podem favorecer a formação de eutéticos e comprometer a eficiência do material refratário. Entre os tijolos analisados, o tijolo B foi o que apresentou maior concentração de Al ao longo da microestrutura (área 4, Figura 44A). As partículas de tonalidade mais clara (áreas 1 e 2, Figura 44A), com alto teor de Al, foram identificadas na microestrutura desse tijolo. Isto representa a utilização de Al (metálico) como antioxidante neste refratário, normalmente, de dimensões de 100µm. As amostras dos Tijolos A e C não apresentaram a presença de antioxidantes (Al, Si) na microestrutura, portanto, uma diferença significativa entre eles.

4.2.1.3 Difração de Raios X (DRX)

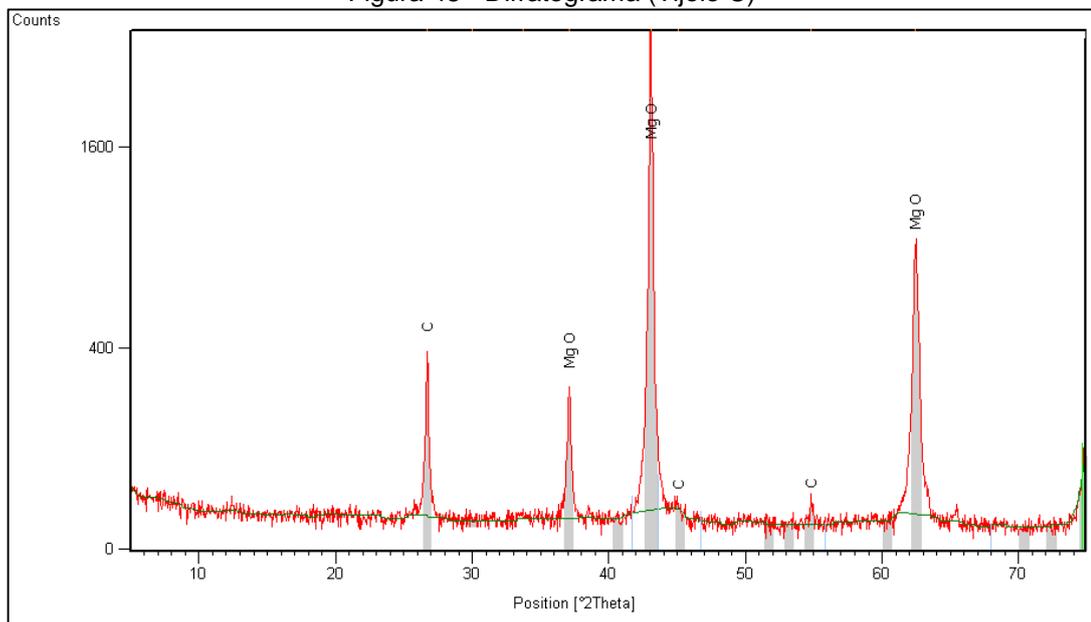
A análise de fases foi realizada com amostras representativas da estrutura geral dos tijolos (agregados e matriz). Como esperado, a análise de DRX (Figuras 47, 48 e 49) indica que as principais fases presentes nas amostras dos tijolos são periclásio (MgO) e carbono grafite (C).

Figura 47 - Difratoograma (Tijolo A)



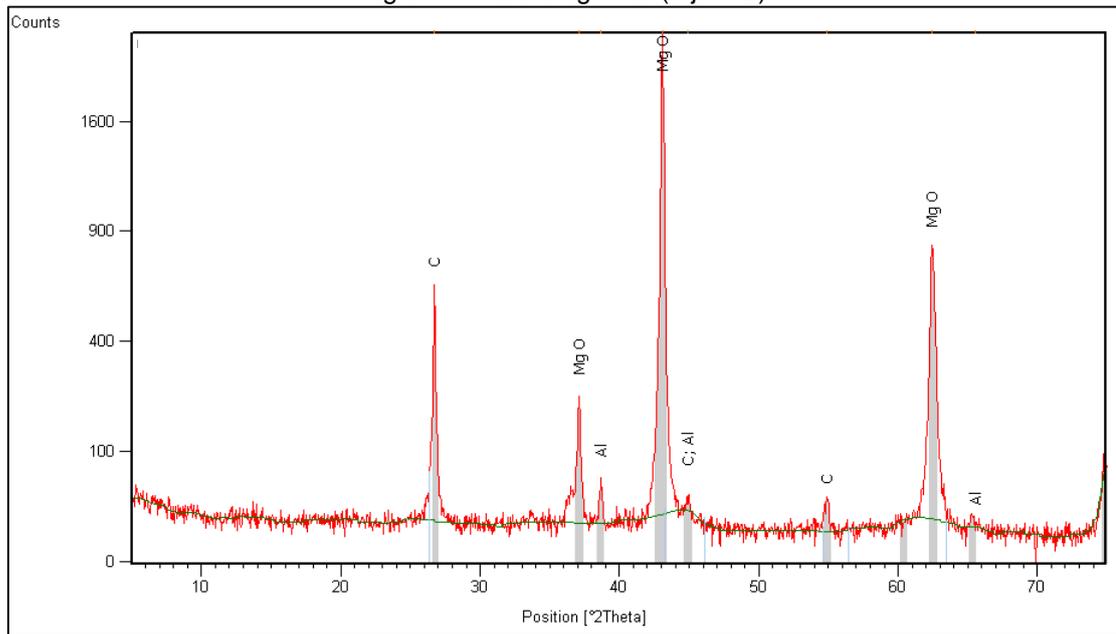
Fonte: O Autor, 2014.

Figura 48 - Difratoograma (Tijolo C)



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 49 - Difratograma (Tijolo B)



Fonte: O Autor, 2014.

Os difratogramas dos tijolos MgO-C A e C, Figuras 47 e 48, respectivamente, mostram, do mesmo modo que fora referido na análise microestrutural, a ausência de fases que pudessem indicar a presença de antioxidantes. Os contaminantes se encontram em baixíssima concentração, como é esperado para um tijolo de qualidade.

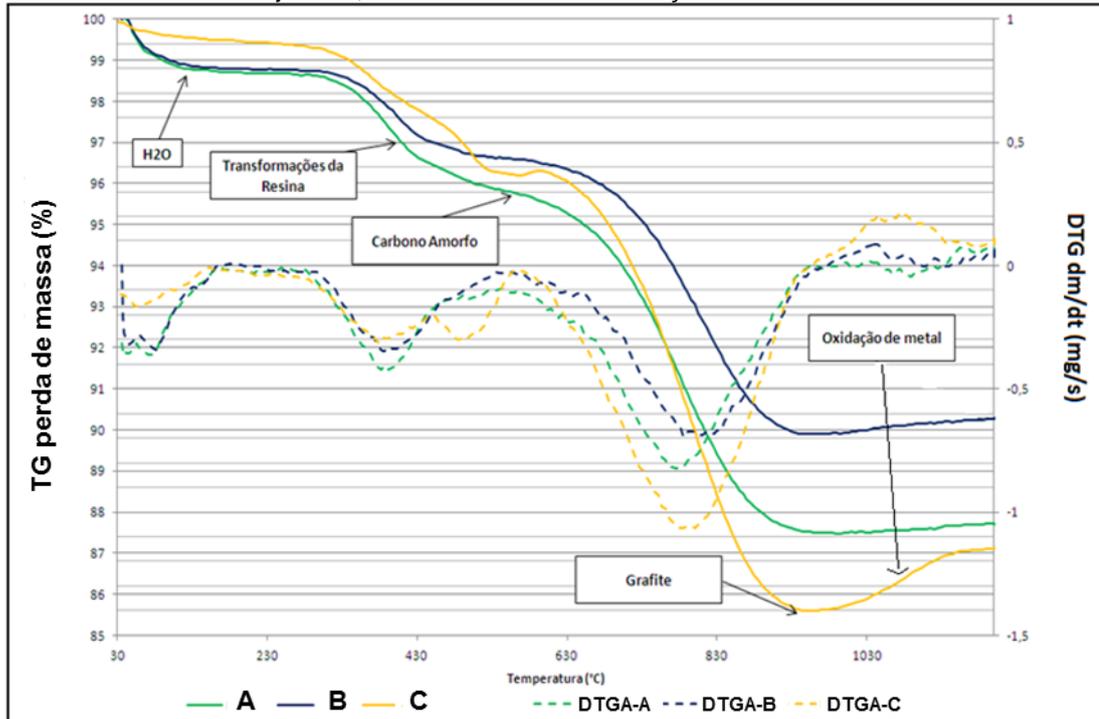
O difratograma do Tijolo B (Fig. 49) mostra que além das fases majoritárias (MgO e C) há presença do Al (metálico) em sua composição. Neste caso, o Al atua como antioxidante, auxiliando na formação de fases que reduzem a oxidação do carbono.

4.2.1.4 Análise Termogravimétrica (TG e DTG) e Infravermelho (FTIR)

Conforme pode ser visto na Figura 50, as perdas de massa na faixa de temperatura de 300-600°C, e picos correspondentes, podem ser atribuídos às transformações das resinas orgânicas. Elas consistem em condensação, oxidação, desidratação e as reações de decomposição que ocorrem simultaneamente. Até 900°C, o vapor de água gerado por várias reações é eliminado, sendo a perda máxima entre 200 e 500°C. Em temperaturas acima de 400°C, CH₄, CO, H₂, uma pequena quantidade de CO₂, benzeno, derivados fenólicos e compostos aromáticos policíclicos podem ser emitidos. O produto destas reações é uma estrutura amorfa

de carbono, em geral, mais susceptível à oxidação. Essa estrutura tende a uma maior ordenação, quando aquecida (em atmosfera redutora) a temperaturas $>1000^{\circ}\text{C}$. As três amostras apresentam quantidade semelhante de ligantes de resina.

Figura 50 - Curvas da análise termogravimétrica (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTG) das amostras de tijolos A, B e C com as transformações ocorridas durante a análise



Fonte: O Autor, 2014.

A queima do grafite ocorre acima de 800°C . Percebe-se que as três composições variam significativamente em relação à quantidade de grafite na amostra: % Grafite: $C < A < B$.

A partir de 1000°C , iniciam-se as reações de oxidação das partículas metálicas. No entanto, somente na amostra B há um ganho de massa significativo devido à oxidação do alumínio (mostrada no difratograma da amostra). Os outros dois tijolos apresentaram um ganho de massa muito pequeno $<0,5\%$, embora a análise de DTG apresente picos representativos de reação de ganho de massa. Neste caso, os teores de antioxidantes (descrito pelo fabricante como presente no Tijolo A e ausente no Tijolo C) devem ser baixos (também não apareceram nas análises anteriores) e relativamente muito baixos, quando comparados com o Tijolo B.

As reações que sucedem a fusão do alumínio estão descritas na sequência:

- a) $<1000^{\circ}\text{C}$: $\text{Al} + 4/3\text{C} \rightarrow \text{Al}_4\text{C}_3$ (Carbono reativo do ligante ou do grafite)
- b) $>1100^{\circ}\text{C}$: $\text{Al}_4\text{C}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ (CO proveniente da combustão do grafite).

É esperada a formação de espinélio (MgAl_2O_4) com a reação do alumínio fundido e/ou Al_2O_3 com MgO e/ou Mg(g) formado pela redução do MgO sendo uma explicação para o aumento de massa em 600°C na amostra B; a qual está de acordo com a literatura, (SCHACHT, 2004).

A Figura 51 apresenta os respectivos espectros no FTIR dos tijolos analisados, procurando identificar o tipo de resina utilizada como ligante, em cada tijolo. É importante fazer uma ressalva: de acordo com o percentual de resina detectado no TGA e a predominância de material inorgânico, a técnica FTIR está no limite de seu uso (5% mínimo), ficando difícil de discernir parte dos picos com a linha de base. No entanto, por meio desta análise e dos picos em destaque na referida figura, pode-se afirmar que a resina utilizada é do tipo fenólica (tipo das comerciais Novolac e Resol). De acordo com o perfil das curvas apresentado na mesma figura, não existe diferenças significativas entre as resinas utilizadas nos tijolos analisados.

Figura 51 - FTIR com a identificação dos picos principais (Tijolos A, B e C)



Fonte: O Autor, 2014.

4.2.2 Caracterização das Massas

a) Composição Química – FRX

A Tabela 3 apresenta o resultado da análise química (Fluorescência de raios X) das massas refratárias.

Tabela 2 - Composição química das massas refratárias

Amostra (%)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Umidade
Massa de soleira								
X	84,5	0,2	1,1	12,7	0,3	1,1	<0,1	0,14
Y	74,1	0,4	1,5	19,1	0,4	4,4	<0,1	0,0
Z	79,6	0,4	1,8	15,2	0,3	2,6	0,14	0,18
Reparo								
J	59,2	1,6	4,4	24,8	0,9	8,5	0,32	0,42
K	80,4	0,2	1,0	13,9	0,3	4,0	<0,1	0,7

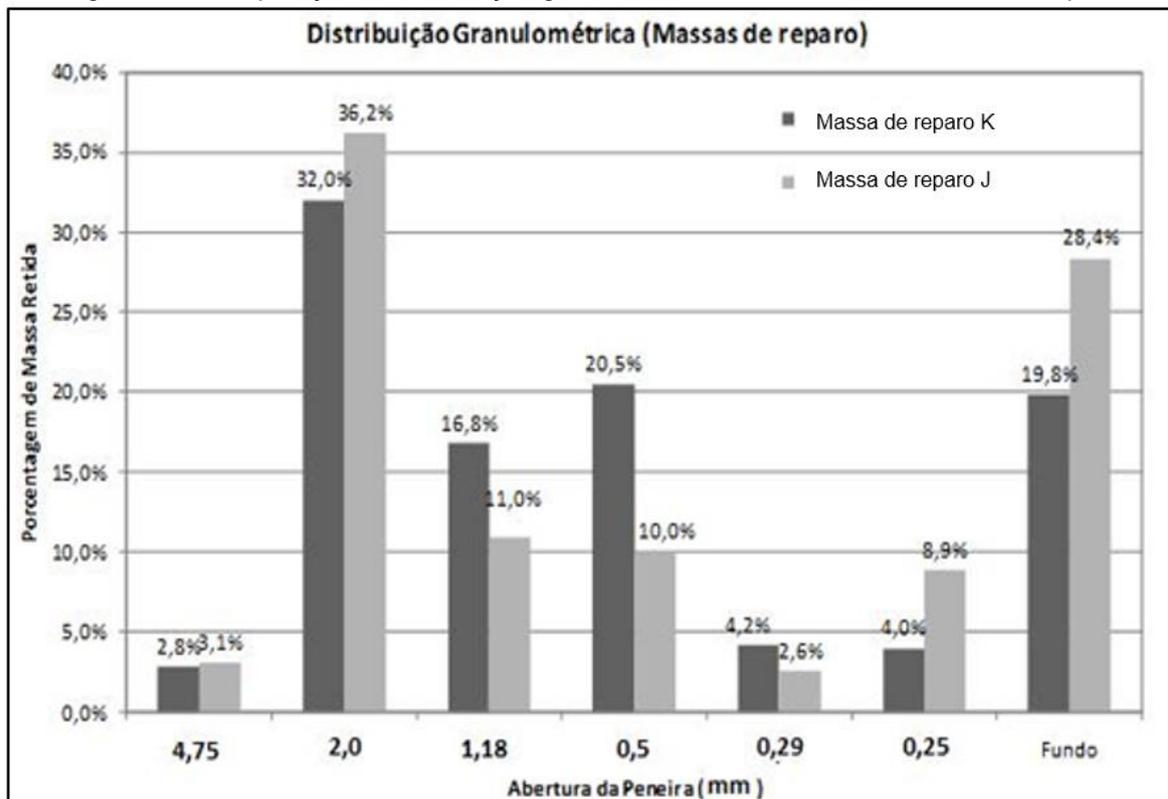
De acordo com a Tabela 3, os principais óxidos presentes nas amostras de massas refratárias são MgO e CaO, tendo caráter magnesiano e dolomítico. Há significativas variações nos teores de Fe₂O₃ e SiO₂, o que afeta a fusibilidade das massas. Destaca-se a Massa X, como a mais refratária de soleira, e a Massa J, que apresenta ligação em menores temperaturas favorecendo a sinterização.

b) Análise Granulométrica

Com base na análise granulométrica das massas de reparo, Figura 52, é constatada uma pequena semelhança na distribuição granulométrica da fração mais grosseira. As duas massas de reparo apresentam, por exemplo, uma maior concentração de partículas retidas na malha 10 (abertura de 2 mm). No entanto, a massa de reparo K apresenta uma quantidade maior de partículas intermediárias

(1,18mm, 0,5 mm e 0,3mm de abertura), enquanto a massa de reparo J apresenta a maior quantidade de partículas finas (retido e passante em 0,25mm).

Figura 52 - Comparação da distribuição granulométrica das massas refratárias de reparo

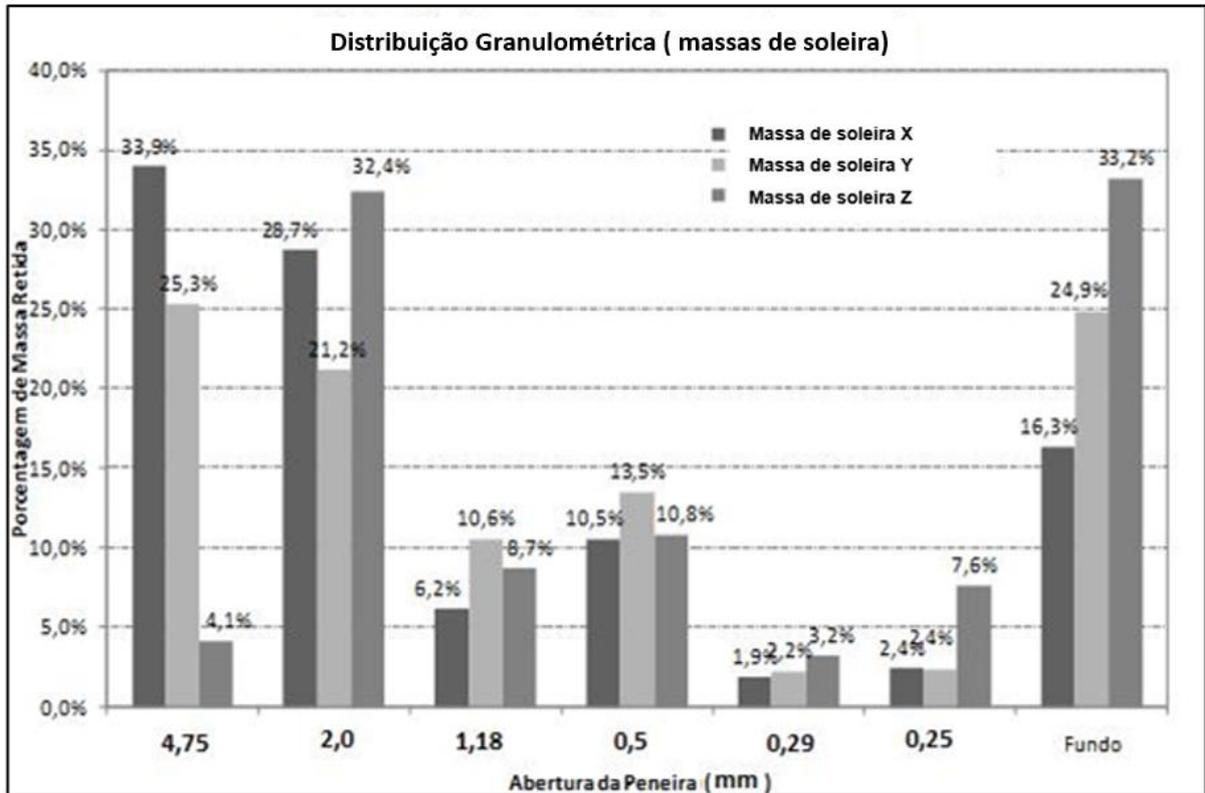


Fonte: O Autor, 2014.

A análise granulométrica comparativa das massas de soleira, Figura 53, apresentou grande diferença na distribuição granulométrica. A maior diferença foi verificada no tamanho médio das partículas maiores (4,75mm e 2mm) e no tamanho médio de partículas finas (< 0,25mm). A massa refratária X, além de possuir a composição mais refratária, apresenta também o maior percentual de partículas grosseiras, em relação às outras duas massas de soleira analisadas. A quantidade de partículas de tamanho intermediário (1,19mm e 0,5mm) apresentou pequenas variações para as três massas analisadas. Outro ponto importante é a grande quantidade de partículas da massa Z passantes na malha 60 (0,25mm). A diferença encontrada na distribuição granulométrica pode ser muito significativa do ponto de vista da compactação e sinterização. A segregação das partículas finas e grosseiras em diferentes camadas durante a compactação pode formar regiões com diferentes

taxas de sinterização e percentual de retração favorecendo a formação de trincas na massa comprometendo o desempenho do forno.

Figura 53 - Comparação da distribuição granulométrica das massas refratárias de soleira

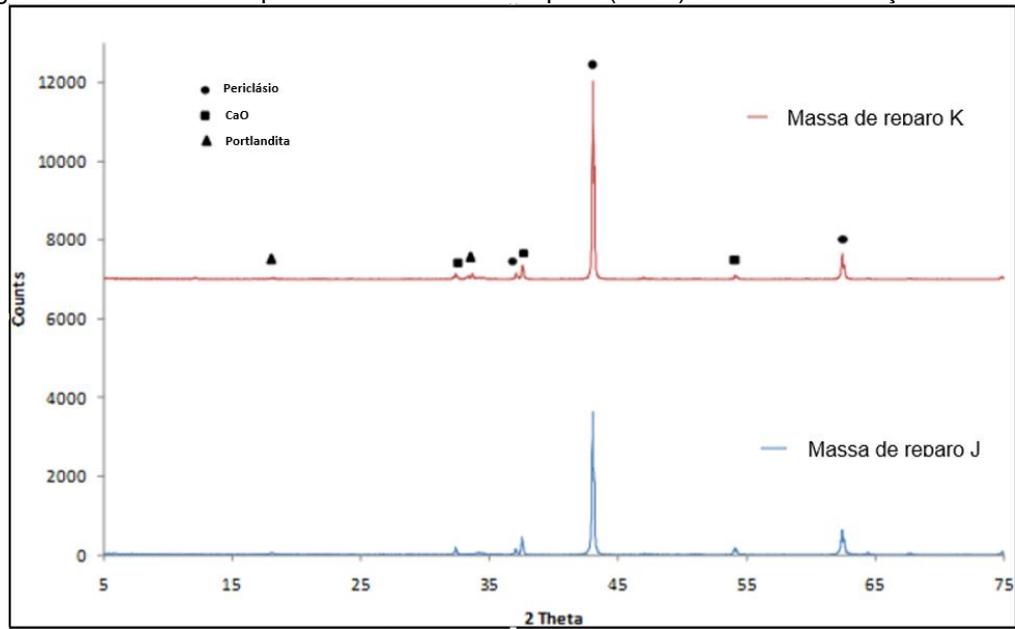


Fonte: O Autor, 2014.

c) Difração de Raios X

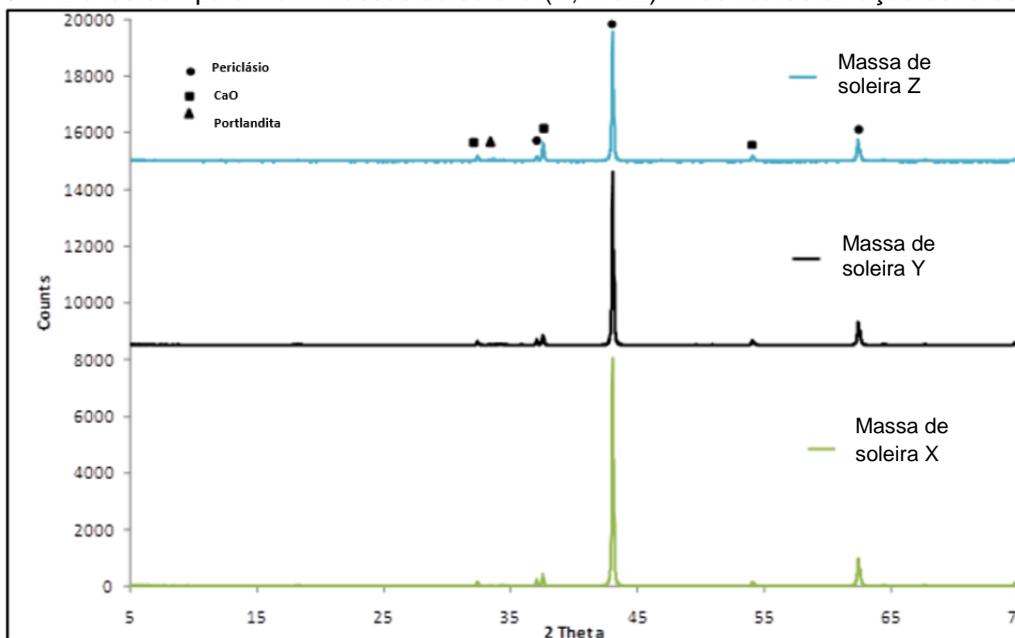
Observa-se nas Figuras 54 e 55 que as amostras de massa refratária, apresentam em sua estrutura as mesmas fases, quais sejam: Periclásio (MgO), cal CaO e traços de Portlandita (Ca(OH)₂). Além disso, para todas as amostras, a fase majoritária é o Periclásio, corroborando com a fluorescência de Raios X (Tabela 3). A técnica de DRX mostra que não há diferença nas massas refratárias quanto às fases cristalinas, qualitativamente.

Figura 54 – Análise comparativa – Massas de reparo (K e J) Técnica de difração de raios X



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 55 – Análise comparativa – Massas de soleira (X, Y e Z) - Técnica de difração de raios X



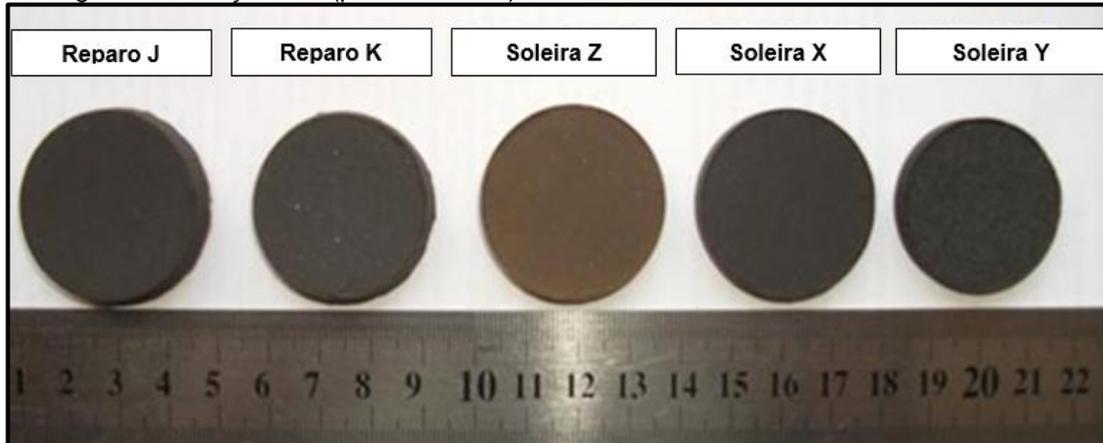
Fonte: O Autor, 2014.

A parte hidratável das massas de soleira pode ser um fator que venha a prejudicar o desempenho das mesmas em uso. Ela significa a abertura de porosidade, prejudicando o empacotamento e atrasando a sinterização, ou mesmo impedindo-a de forma específica e localizada em um determinado ponto.

d) Ensaio de Sinterização

A Figura 56 apresenta a imagem das massas refratárias sinterizadas a 1400°C. A retração dos corpos de prova sinterizados a 1400°C estão descritos na Tabela 4.

Figura 56 - Fração fina (passante # 48) das massas refratárias sinterizadas a 1400°C



Fonte: O Autor, 2014.

Tabela 3 - Retração dos corpos de prova sinterizados a 1400°C

Massas Refratárias	Diâmetro verde (mm)	Diâmetro queimado (mm)	Retração (%)
Massa de Soleira X	37	34,8	5,95
Massa de Soleira Y	37	32,2	12,97
Massa de Soleira Z	37	35,3	4,59
Massa de reparo J	37	35,4	4,32
Massa de reparo K	37	34,1	7,84

Fonte: O Autor, 2014.

A retração dos corpos de prova em função da queima a 1400°C (Tabela 4) é uma consequência da composição química, fases presentes, granulometria e compactação. Salienta-se também que a retração será influenciada pela quantidade de fase líquida formada e pela viscosidade da mesma.

Uma vez que se faz um corte por peneira, descartando a fração mais grosseira, elimina-se principalmente boa parte dos agregados magnesianos, potencializando-se a reatividade das massas, em relação à sinterização e, por

consequente, da retração de queima. Esta será, portanto, maior que da massa completa. Assim, a influência da distribuição granulométrica apresenta menor influência neste teste de retração.

Em relação às massas de reparo, pode-se dizer que a massa K apresenta uma retração maior que a Massa J e, possivelmente, muito acentuada. Sobretudo, deve-se considerar que as massas de reparo, além da retração de queima, devem possuir compatibilidade com a expansão térmica das massas de socagem.

Quanto às massas de soleira, salienta-se a excessiva retração da Massa Y, chegando a 12,97%. As outras duas massas apresentaram valores próximos entre si.

Nota-se que a retração não reflete uma análise mais superficial da composição química, pois depende de uma propriedade mais complexa, como é o caso da viscosidade da fase líquida formada. Assim, a menor retração das massas pode ser uma consequência direta da razão $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ e da viscosidade elevada, características dos silicatos de cálcio.

O teste descrito acima destaca a importância de se evitar a segregação das massas no transporte e na aplicação, devido à elevada retração que apresenta a parte mais fina das massas.

4.2.3 Análise das Luvas EBT

O canal EBT é um componente de grande importância na operação de fornos elétricos a arco. Por esse motivo, esse conjunto refratário foi detalhadamente analisado no trabalho.

Ao se analisar as propriedades físicas fornecidas pelos fabricantes identificam-se materiais com características bastante similares. (Tabela 4).

Tabela 4 - Composição química das luvas EBT

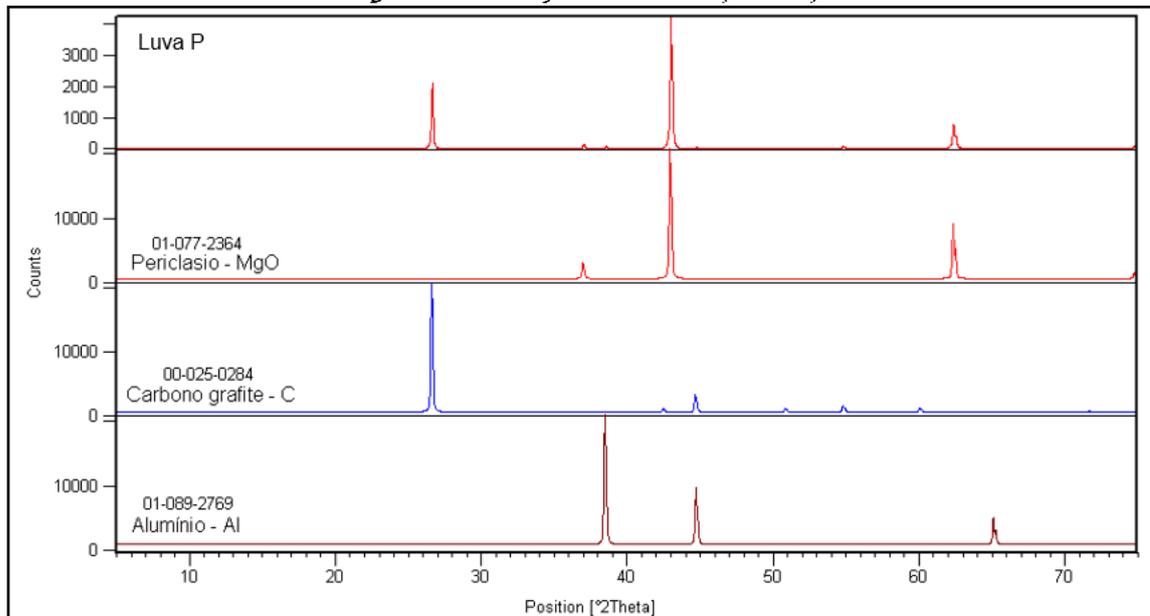
Composição	% MgO	% C	% CaO	% SiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃
EBT - P	87,7	12,3	-	-	-	-
EBT - Q	86,8	13,2	-	-	-	-
EBT - R	92	5,7	1,8	0,4	0,1	0,1

As principais diferenças são uma porosidade aparente menor e uma resistência à compressão consideravelmente maior da amostra R, em relação às outras.

a) Amostra P

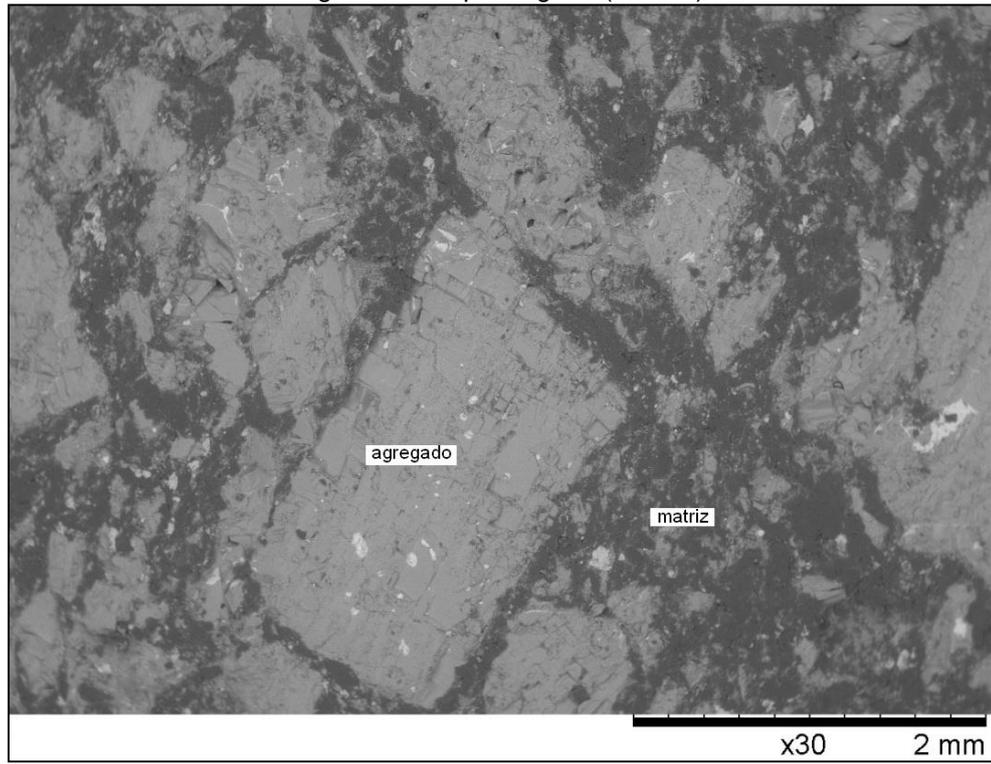
A análise das fases minerais (Figura 57), realizada por meio de difração de raios X mostra um material de boa pureza, sem a presença de contaminantes em quantidade significativa. A peça apresenta magnésia, grafite e antioxidante de alumínio.

Figura 57 - Difração de raios X (Luva P)



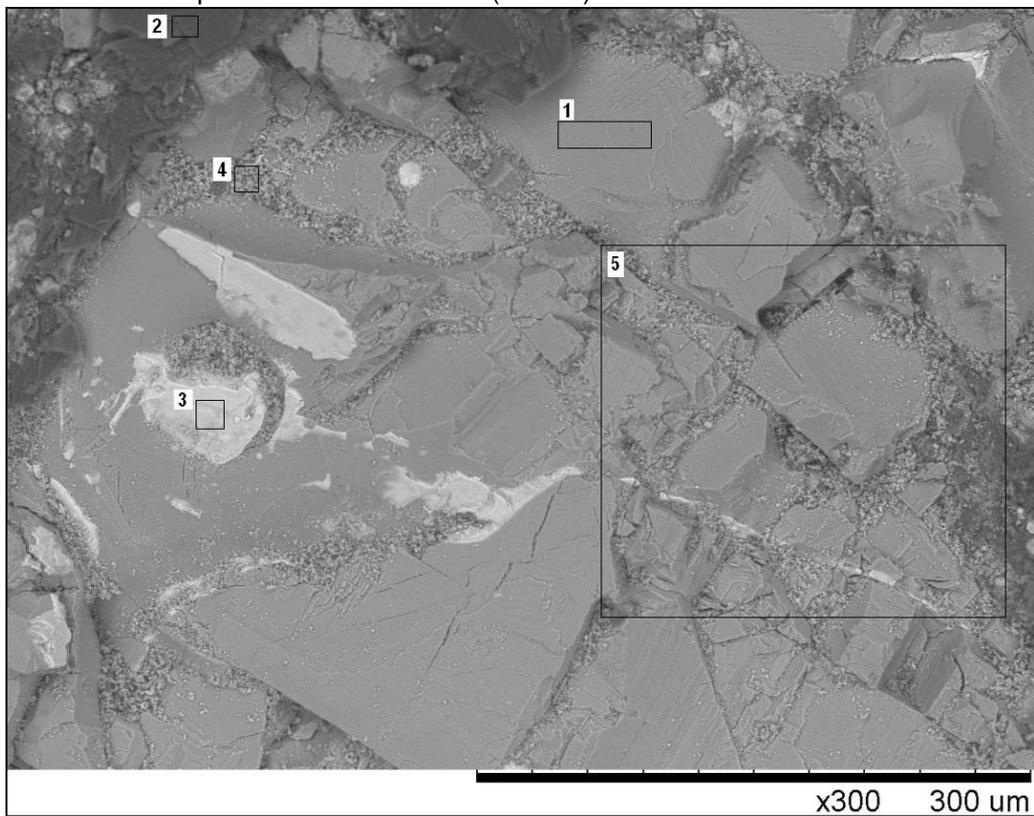
A Figura 58 apresenta o aspecto geral da microestrutura mostrando agregados de tamanhos grandes e matriz de carbono. Em maiores magnitudes, pode-se observar que os agregados são de magnésia eletrofundida e a matriz rica em carbono grafite (Figura 59). Alguma contaminação nos agregados é usual, como mostram as áreas mais brancas dentro dos agregados.

Figura 58 - Aspecto geral (Luva P)



Fonte: O Autor, 2014.

Figura 59 - Análise química via microsonda (Luva P) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 5



Fonte: O Autor, 2014.

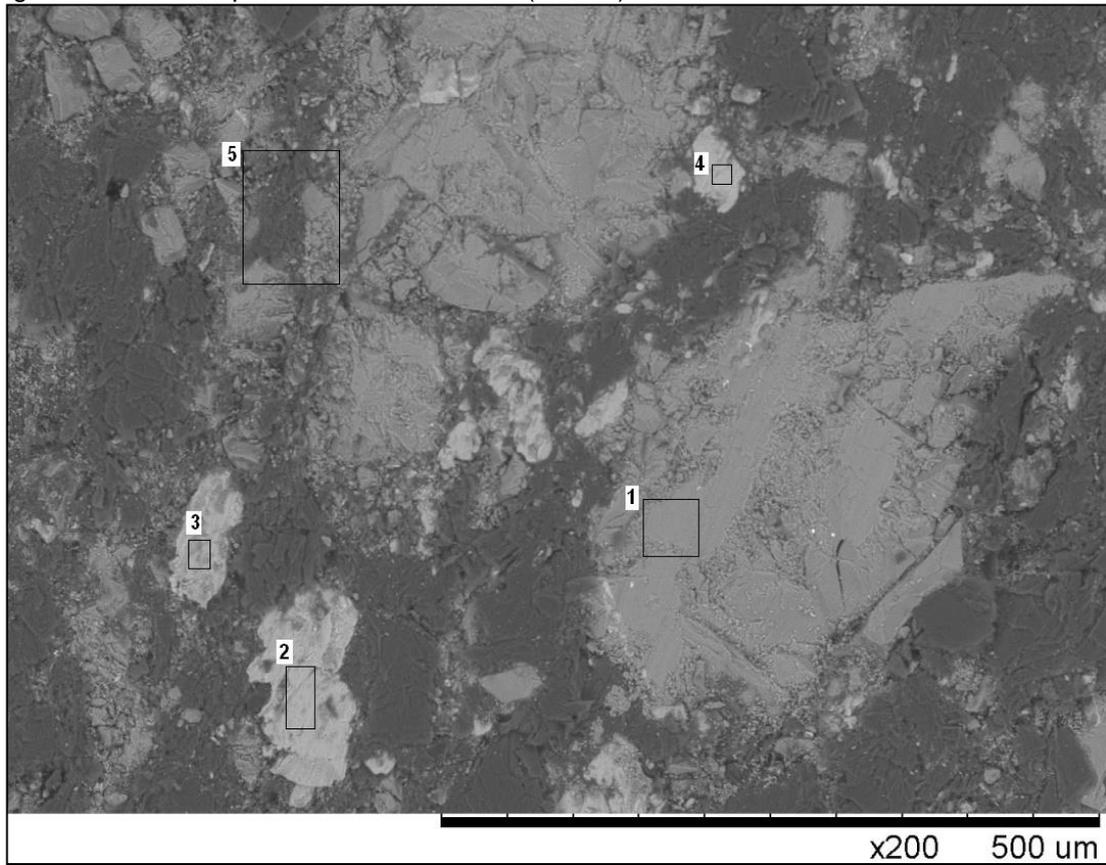
Tabela 5 - Análises dos pontos e áreas da Figura 59

Elementos / % massa	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
C	13,79	86,05	11,80	45,56	25,09
O	43,02	10,61	43,27	33,44	40,43
Mg	42,41	3,00	10,42	18,00	32,23
Al	0,22	0,20	0,19	1,34	-
Si	0,08	0,05	9,28	0,54	0,20
Ca	0,47	0,09	24,08	1,43	0,57
Outros	-	-	0,86	-	0,78

As análises químicas das áreas (Tabela 5) mostram uma considerável pureza dos agregados (área 1 e 5), com exceção da área 3, mostrando uma composição típica de uma fase de baixa temperatura de fusão. A área 4 mostra uma possível hidratação do material. A área 2 mostra uma morfologia típica de grafite.

A análise dos pontos da Figura 60 mostra a presença de partículas de alumínio, de acordo com a composição das áreas 2, 3 e 4 na Tabela 6. Este material atua como antioxidante, sendo comum seu uso em tijolos de MgO-C utilizados em linha de escória de panela de aço. Em uma reação com a magnésia é possível a formação de espinélio, o que aumentaria a resistência ao choque térmico, além do bloqueio dos poros ao oxigênio.

Figura 60 - Análise química via microsonda (Luva P) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 6



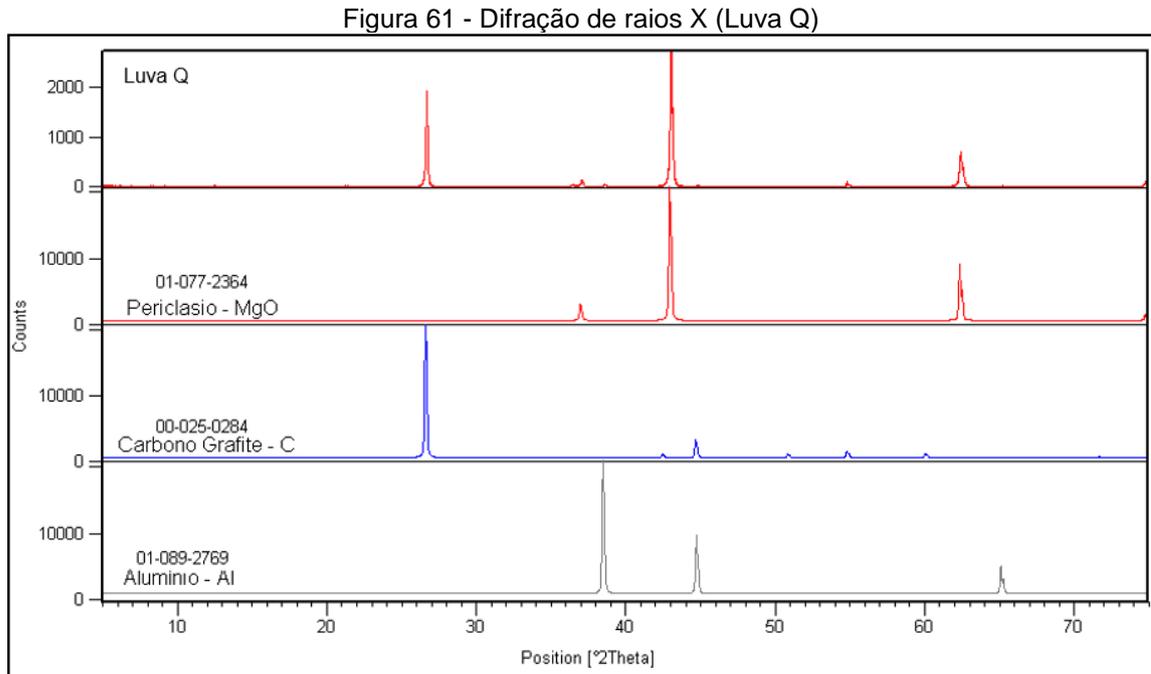
Fonte: O Autor, 2014.

Tabela 6 - Análises dos pontos e áreas da Figura 60

Elementos / % massa	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
C	23,07	46,25	45,67	38,85	54,03
O	35,53	10,08	16,21	11,37	28,62
Mg	37,24	3,52	8,02	4,32	15,45
Al	-	40,01	29,93	45,39	1,65
Si	-	0,07	0,09	-	0,09
Ca	0,32	0,06	0,08	0,08	0,16
Outros	1,84	-	-	-	-

b) Amostra Q

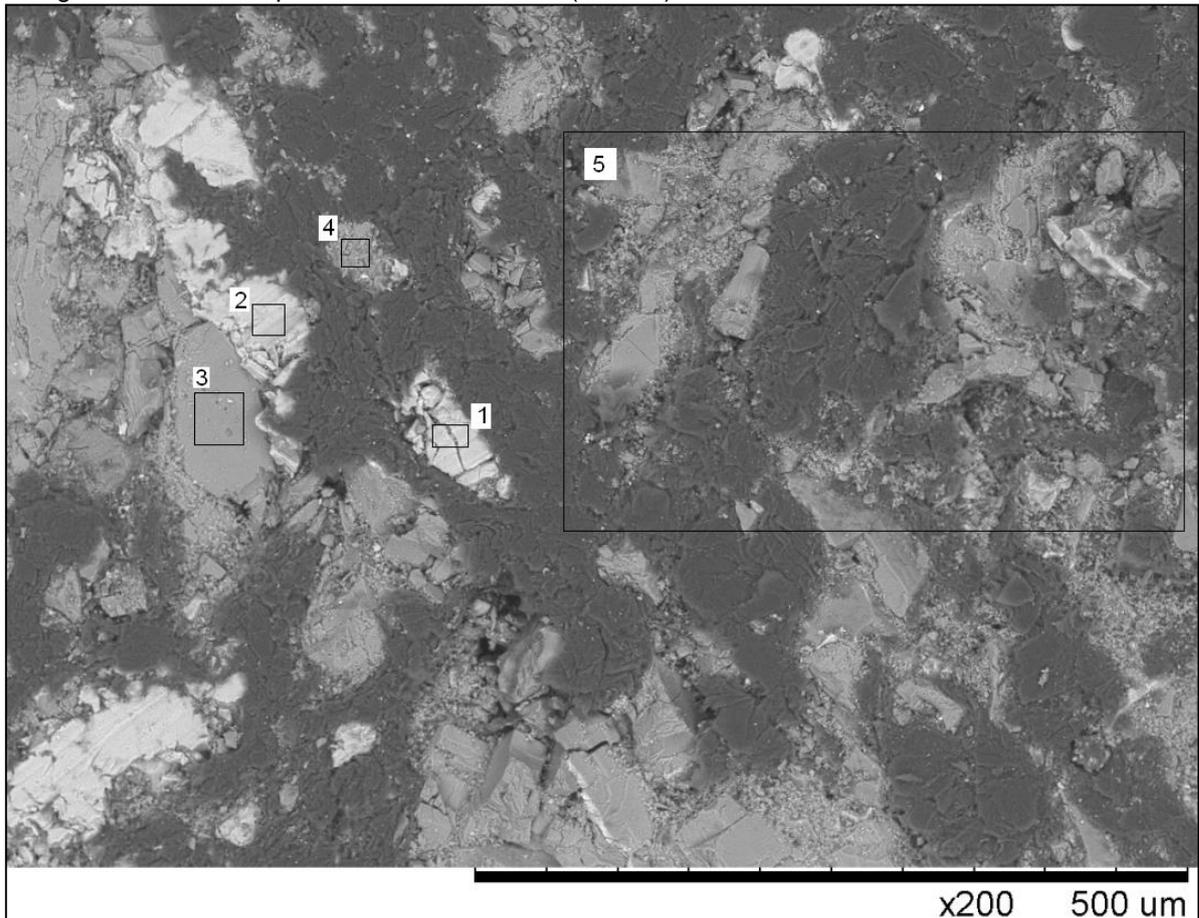
Na Figura 61 é possível observar a semelhança das fases minerais da Luva Q com as da Luva P (Figura 57).



Fonte: O Autor, 2014.

A análise em MEV/EDS (Figura 62 e Tabela 7) mostra novamente partículas de magnésia e grafite como os principais constituintes. Em princípio, a pureza é um pouco menor em relação à Luva P, já que se observam maiores teores de ferro (área 3 e 5).

Figura 62 - Análise química via microsonda (Luva Q) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 7



Fonte: O Autor, 2014.

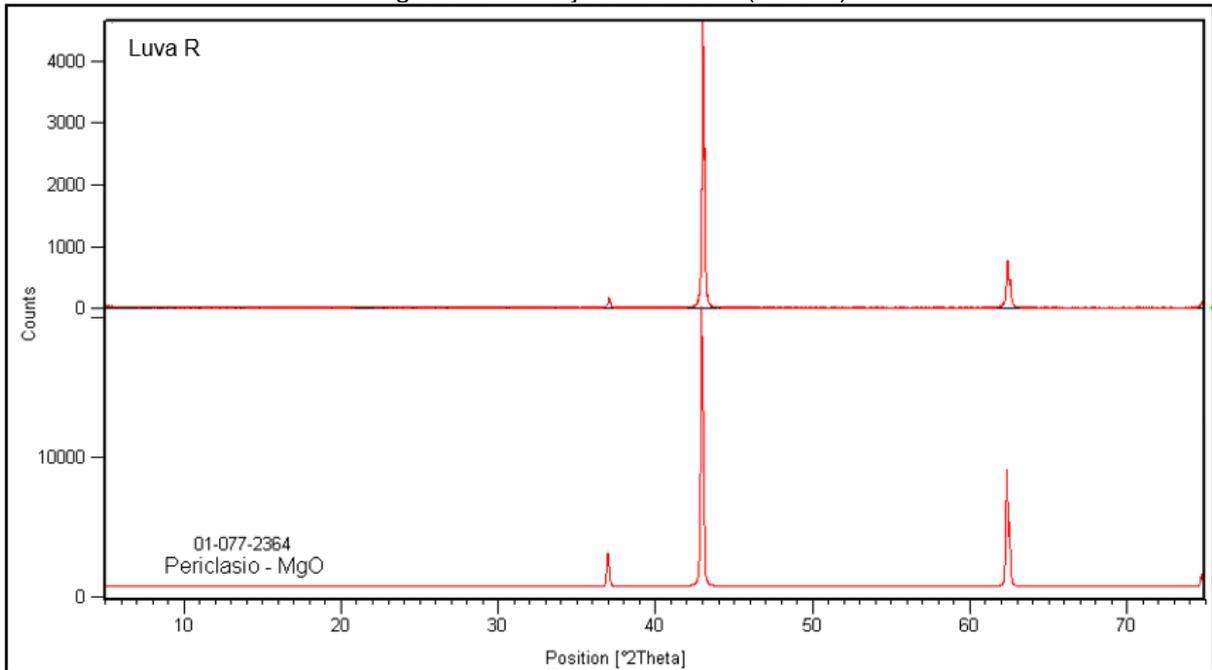
Tabela 7 - Análises dos pontos e áreas da Figura 62

Elementos / % massa	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
C	36,85	33,14	19,87	35,31	64,28
O	11,02	7,98	42,52	36,19	23,94
Mg	27,62	30,27	25,61	26,40	10,99
Al	18,92	23,08	-	-	0,33
Si	0,13		-	0,10	0,09
Ca	0,37		0,32	0,32	0,20
Fe	0,11		0,19	0,15	0,15
Outros	4,98	5,53	1,48	1,53	

c) Amostra R

A análise de DRX confirma a ausência de carbono cristalino e Al, apresentando apenas o periclásio (Figura 63), o que diferencia este material em relação aos outros (P e Q).

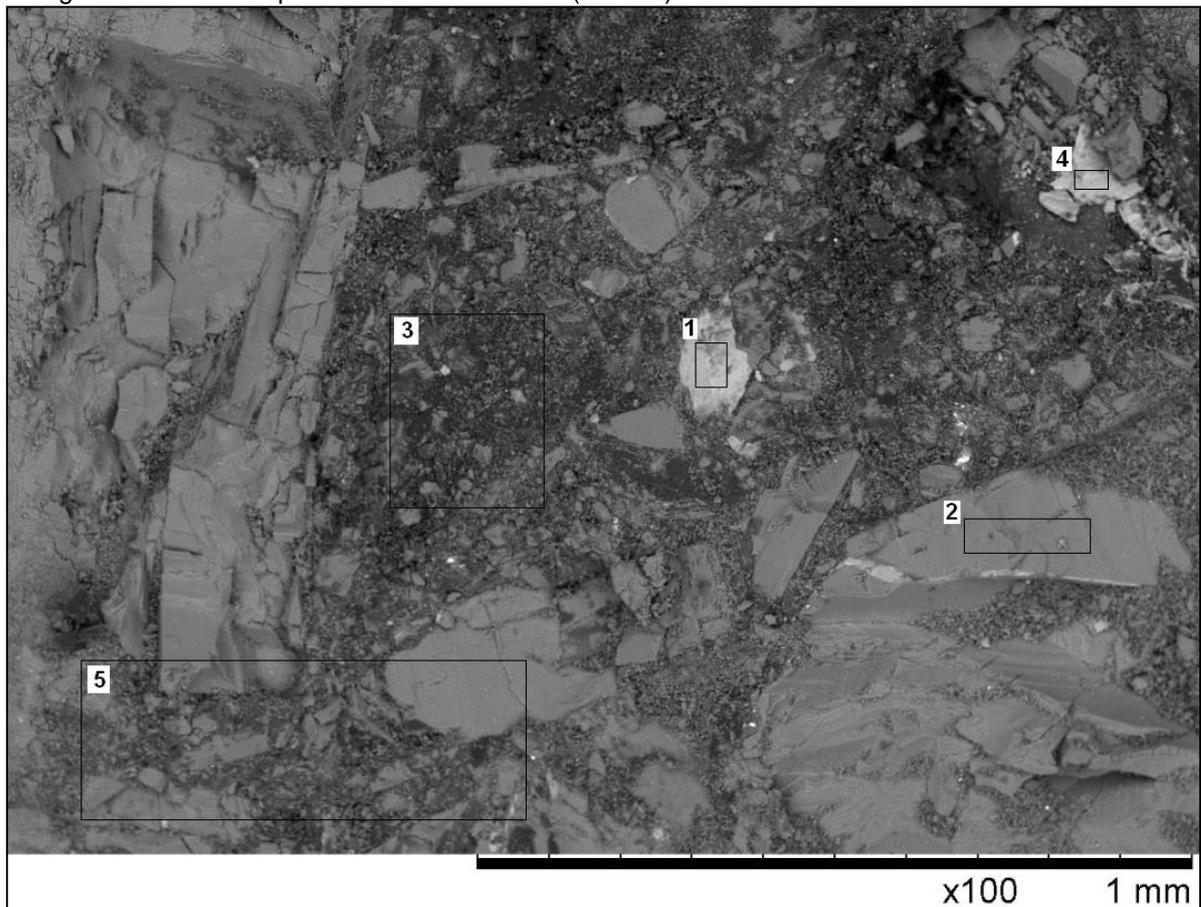
Figura 63 - Difração de raios X (Luva R)



Fonte: O Autor, 2014.

A análise microestrutural da Luva R mostra também uma peça que apresenta algumas diferenças em relação às amostras P e Q. Ela apresenta teores bem menores de carbono, sendo o ligante um material resinado em vez de ligação à piche, e não possui grafite, apenas carbono amorfo (Figura 64 e Tabela 8). Outra diferença é a ausência de antioxidante de Al na Luva R. Nota-se também a presença de partículas grandes ricas em cálcio (áreas 1 e 4). A ausência deste na DRX indica que se deve tratar de algum 'contaminante', mas por ser um óxido refratário, pouco deve intervir nas propriedades finais das peças.

Figura 64 - Análise química via microsonda (Luva R) / Pontos e áreas relacionados à Tabela 8



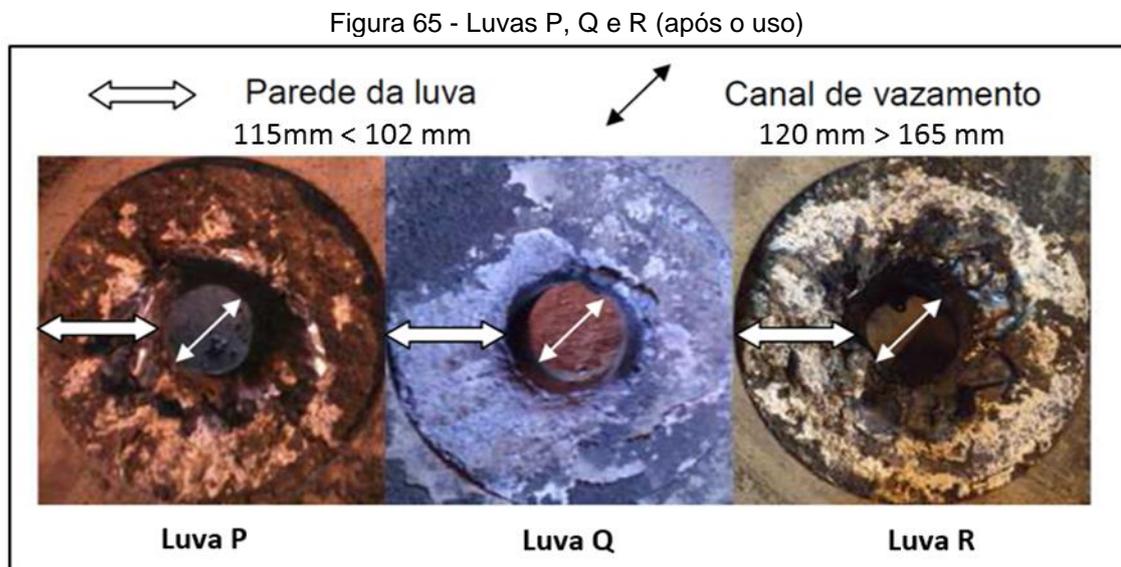
Fonte: O Autor, 2014.

Tabela 8 - Análises dos pontos e áreas da Figura 64

Elementos / % massa	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5
C	27,55	17,07	59,71	28,17	36,97
O	38,23	42,49	24,95	33,39	35,14
Mg	12,54	39,48	14,06	12,03	26,57
Al	-	-	-	-	-
Si	8,65	0,1	0,15	7,78	0,15
Ca	12,75	0,25	0,33	16,00	0,40
Fe	-	0,49	0,16	-	0,34
Outros	0,27	0,12	0,64	1,63 0,20 0,39 0,40	0,42

d) Análise das Luvas P, Q e R post mortem

Em relação ao desgaste durante a operação, as três luvas tiveram desempenho similar, não ocorrendo problemas operacionais durante os testes. Mesmo quando submetidas ao número médio de 140 corridas em operação, todas as luvas tiveram desgaste uniforme (diâmetro final abaixo de 165 mm), como se pode observar na Figura 65. Tanto a parede das luvas quanto o canal de vazamento mantiveram-se íntegros em todos os testes, de acordo com o padrão interno da empresa.



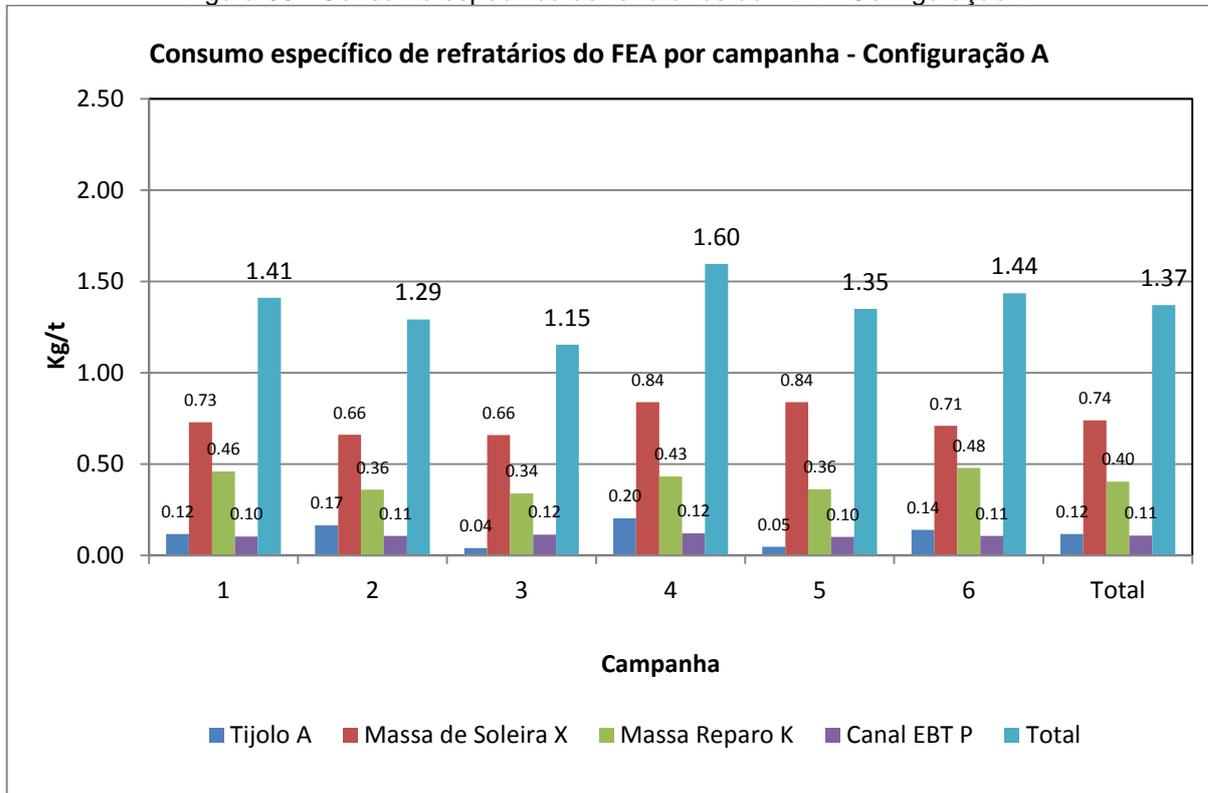
4.3 RESULTADOS OPERACIONAIS

Como produto final do trabalho, seguem nos gráficos seguintes (Figuras 66, 67 e 68) os resultados dos testes realizados em forno elétrico a arco com as Configurações A e B.

No gráfico da Figura 66 pode-se identificar uma grande estabilidade do consumo de refratários da Configuração A ao longo das 6 campanhas. Além disso, ao desmembrar o consumo por região, nota-se que 54% do consumo de refratários são provenientes de massa de soleira (massa utilizada na montagem da carcaça), seguido da massa de reparo à quente com 29% do consumo. Ao analisar o consumo dos demais componentes refratários da Configuração A, tem-se que 9% do consumo

são provenientes de tijolos e 8% de componentes do canal EBT. Essa avaliação tem como resultado um consumo de 17% de materiais moldados e 83 % de materiais não moldados na configuração A.

Figura 66 - Consumo específico de refratários do FEA - Configuração A

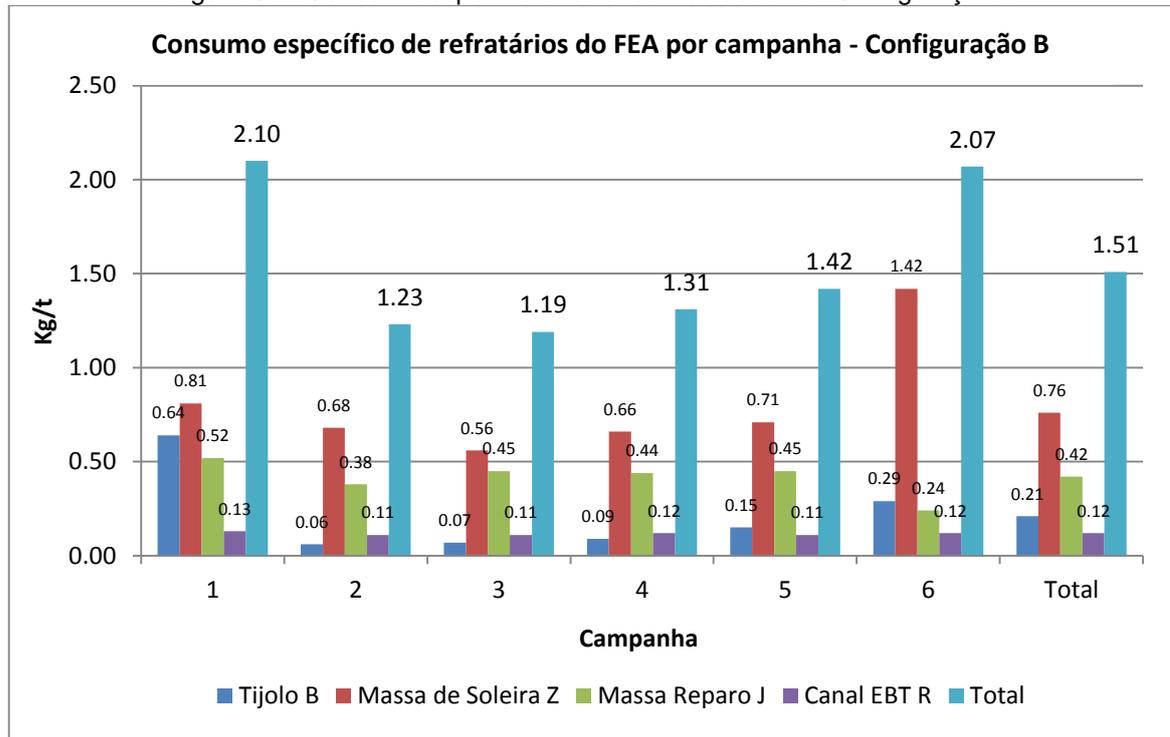


Fonte: o Autor, 2016.

Ao analisar os resultados da Configuração B (Figura 67), nota-se que as campanhas 1 e 6 tiveram um consumo maior que as demais campanhas. Na campanha 1, o maior consumo foi motivado pela montagem total do forno, e na campanha 6, pelo menor período de operação devido a parada de produção da aciaria, sendo que nas demais campanhas o consumo foi bastante estável.

Analisando detalhadamente os consumos, observa-se que o consumo de massa de soleira (construção) representa 50% do consumo total, seguido da massa de reparo que impacta em 28%. Em relação aos tijolos utilizados na Configuração B, eles representam 14% do consumo, enquanto o canal EBT impacta em 8% do consumo. Sendo assim, o consumo total da Configuração B é composto por 22% de materiais moldados e 78% de materiais não moldados.

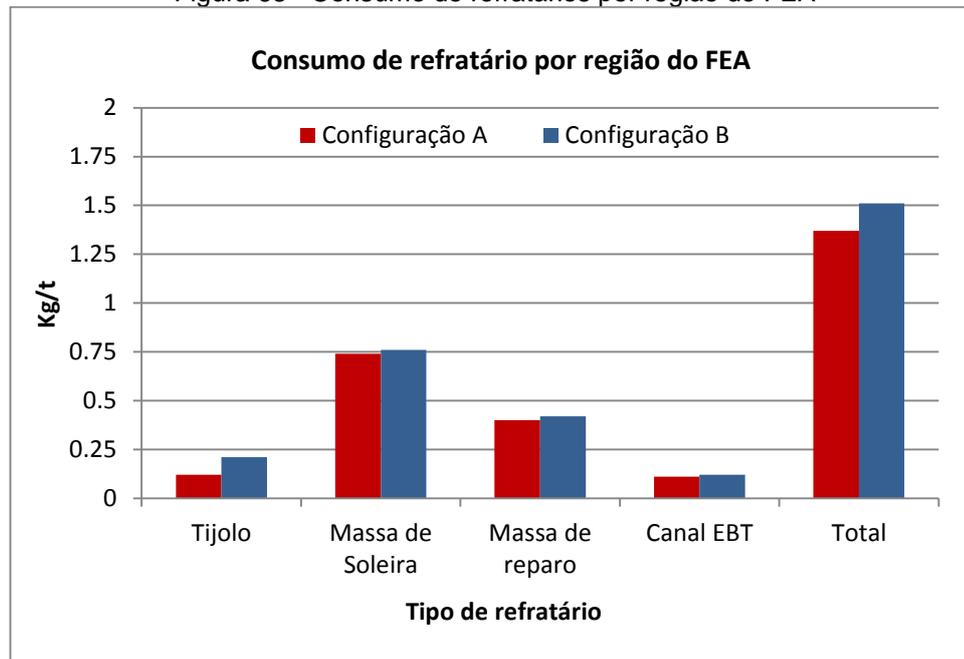
Figura 67 - Consumo específico de refratários do FEA - Configuração B



Comparando as Configurações A e B, observa-se que a Configuração B apresentou um consumo 10% maior que a Configuração A, motivado, principalmente, pelo maior consumo de tijolos na primeira campanha onde houve a montagem completa do forno.

De forma geral, os consumos das Configurações A e B foram muito satisfatórios e todos os materiais apresentaram a qualidade exigida para o processo de aciaria. Além disso, se retirados os fatores de montagem total da campanha 1 e de parada da aciaria na campanha 6 da configuração B, tem-se resultados muito semelhantes entre as diferentes configurações e fornecedores (Figura 68).

Figura 68 - Consumo de refratários por região do FEA



Fonte: O Autor, 2014.

Por fim, vale destacar que durante as 12 campanhas de teste, não houve problemas operacionais causados por nenhum dos componentes refratários que comprometessem a produção ou a segurança operacional, o que comprova a alta qualidade dos materiais fornecidos por ambos fornecedores.

Como resultado das análises e testes, foi realizada a substituição do Tijolo C pelo Tijolo A, gerando dessa forma, uma redução de custo de 40% nesse item, devido a menor nobreza e conseqüentemente menor preço do Tijolo A. Além disso, o conhecimento gerado com as análises dos refratários do canal EBT, assim como com os testes realizados, trouxe uma redução de 29,9% no custo desses componentes.

Em relação as massas refratárias identificou-se um consumo praticamente igual entre os fornecedores, sendo que todas as massas escolhidas para o teste apresentaram bom desempenho em operação, tanto no que diz respeito ao consumo quanto a segurança operacional.

5 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos no estudo foi possível concluir que:

Em relação ao desempenho do forno e dos materiais

As melhorias realizadas no forno elétrico a arco ao longo dos anos, assim como o maior controle do processo de aciaria, possibilitaram uma diminuição de 10% no FeO da escória do forno de 2012 a 2014, tendo como consequência uma diminuição de 30% no consumo de massa de reparo a quente nos anos de 2013 e 2014.

Como conclusão dos testes em operação, pode-se constatar que todos os materiais testados nas Configurações A e B atenderam os requisitos necessários e tiveram desempenho satisfatório em operação. Em relação ao consumo de refratários, a Configuração B apresentou um consumo levemente maior devido, principalmente, à montagem completa do forno na primeira campanha e ao menor período de operação da última campanha. Levando-se isso em consideração, pode-se afirmar que os resultados foram muito semelhantes.

Em relação às análises realizadas, pode-se concluir que a caracterização de todos os materiais foi imprescindível para escolha correta dos materiais testados em operação e para o sucesso dos testes.

Através da caracterização detalhada de novos materiais e testes estruturados em operação, foi possível realizar a escolha dos materiais mais adequados em relação à qualidade e custo para o forno em estudo, contribuindo para a segurança operacional, assim como para a diminuição dos custos da empresa.

Quanto à caracterização dos tijolos

Os três tijolos analisados apresentam propriedades adequadas a sua utilização. A análise microestrutural mostrou uma boa distribuição de tamanho de partículas, o que favorece o empacotamento das mesmas e, conseqüentemente, a otimização da densidade do conformado e o aumento da tenacidade à fratura do tijolo. Além disso, alguns agregados apresentam aspecto típico de partículas/grãos

eletrofundidos contribuindo para a melhora no desempenho dos refratários, aumentando a resistência à corrosão e, por conseguinte, a vida útil dos mesmos.

De um modo geral os tijolos apresentaram baixos teores de contaminantes ou impurezas como óxidos de silício, alumínio, cálcio ou ferro sendo inerentes à matéria-prima. Portanto, neste quesito, todos os tijolos analisados apresentam boa qualidade.

A análise por difração de raios X mostrou as fases periclásio e grafite, sem a presença de fases contaminantes. Dentre os tijolos analisados, somente o Tijolo B apresentou alumínio (metálico). Este fato foi também verificado na análise microestrutural. Isto significa a utilização de Al como antioxidante nesse refratário, diferentemente dos demais tijolos analisados.

A caracterização por termogravimetria apresentou um comportamento semelhante entre os tijolos até $\sim 800^{\circ}\text{C}$. Acima desta temperatura a decomposição/volatização de orgânicos e carbono foi $\text{C} < \text{A} < \text{B}$. Em temperaturas maiores ocorre um ganho de massa mais significativo ao tijolo B devido à oxidação do Al. Com base na análise por FTIR, pode-se concluir que as resinas utilizadas nos três tijolos são do tipo fenólica, não existindo diferenças significativas entre elas.

A substituição do Tijolo C pelo Tijolo A gerou uma redução de custo de 40% nesse item, devido ao menor preço do Tijolo A, sem ocorrer diferença no desempenho do mesmo no forno.

Quanto à caracterização das massas refratárias

As massas refratárias utilizadas na soleira do forno, resume-se que as mesmas são constituídas principalmente de óxidos de elevada refratariedade como MgO e CaO, possuindo caráter magnésiano e dolomítico. Há significativas variações nos teores de Fe_2O_3 e SiO_2 , o que afeta a fusibilidade das massas. Variações na quantidade de CaO e na razão CaO/SiO_2 significam também mudanças na capacidade da massa reter as infiltrações. Por sua composição, a Massa X, é a massa de soleira mais refratária, e a Massa J, a massa de reparo que apresenta ligação em menores temperaturas.

A análise granulométrica comparativa das massas de soleira apresentou grande diferença na distribuição granulométrica entre elas. A maior diferença foi verificada no tamanho médio das partículas maiores (4,75mm e 2mm) e no tamanho

médio de partículas finas ($< 0,25\text{mm}$). A massa refratária X, além de possuir a composição mais refratária, apresenta também o maior percentual de partículas grosseiras, em relação às outras duas massas de soleira analisadas. A massa de reparo J apresenta considerável maior quantidade de partículas finas (retido e passante em $0,25\text{mm}$). As diferenças encontradas na distribuição granulométrica das massas, as quais podem ocorrer em diferentes lotes da mesma, deve ser avaliada criteriosamente. Elas podem ser significativas do ponto de vista da compactação e sinterização.

No teste de retração de queima a partir da confecção de corpos de prova constituídos da fração fina das massas, a Massa K apresentou maior retração (7,8%) em relação à Massa J (4,32%). Já para as massas de soleira, destaca-se a excessiva retração da Massa Y, chegando a 12,97%. A massa total (finos + grossos) apresenta uma retração de 1-2%. Isto prova a importância de se evitar a segregação das massas, pois a fração mais fina apresenta elevada retração de queima, o que pode causar problemas no desempenho final do produto.

A técnica de DRX mostrou que não há diferença significativa nas massas refratárias quanto às fases cristalinas, qualitativamente. No entanto, por apresentarem cal livre, as massas devem ser estocadas e manuseadas com cuidado para se evitar a hidratação das mesmas.

Quanto à caracterização dos refratários do canal EBT

Por fim, quanto à caracterização dos refratários do canal EBT, após a análise detalhada das luvas selecionadas e a análise dos testes de desempenho em operação, concluiu-se que os materiais P, Q e R atendem tecnicamente as necessidades da aciaria onde foram testadas. Os testes realizados com os diferentes tipos de canal EBT atestaram a qualidade dos três materiais.

Os materiais P e Q apresentaram grande semelhança em todas as análises, podendo-se levantar a possibilidade de serem fabricados com as mesmas matérias-primas, tendo somente a diferença em relação à nomenclatura comercial. Ambos apresentaram como fases o periclásio, o grafite e o alumínio (antioxidante), elevado teor de carbono (grafite) e grão/partículas eletrofundidos. A luva R apresentou somente a fase periclásio, com menor teor de carbono (somente amorfo) e partículas eletrofundidas.

O conhecimento gerado com as análises dos refratários do canal EBT, incluindo-se a análise das fases minerais e da microestrutura, assim como com os testes realizados em operação, obteve-se uma redução de 29,9% no custo destes componentes.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Testar outros modelos de tijolos fabricados com matérias-primas menos nobres e, conseqüentemente, de menor custo, já que se comprovou nos testes realizados, a possibilidade de utilização de refratários de menor nobreza sem impactos no processo.

Revisar o residual mínimo para substituição dos tijolos buscando uma utilização maior desse componente.

Testar o conjunto EBT com orifício cônico, com foco em menor consumo de refratários e redução da passagem de escória do forno para a panela.

REFERÊNCIAS

ABM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. C. d. Disponível em: <www.abmonline.com.br/abm_hotsite/mini/t5.php>. Acesso em: 3 de mai. 2015.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10237**: Materiais refratários – Classificação. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16229**: Sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro, 2013.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte e Ciência, 1997.

ÁVILA, T. A. **Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em:<
http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8QVJ4C/condicionamento_de_esc_rias_em_fea_para_otimiza__o_das_coni__es_d_e_espuma__o__da_esc_ria_e_refino_do_a_o_.pdf?sequence=1>. Acesso em: 3 de mai. 2015.

AZA, A. H. *et al.* Analytical Characterization of a Magnesia-Graphite Refractory. **Journal of the American Ceramic Society**, [S. l.], v. 89, n. 5, p. 1704-1708, Apr. 2006. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia, Parte I: Propriedades microestruturais. **Cerâmica**, São Paulo, vol. 58, n. 347, p. 280-285, Jul./Set. 2012. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

_____. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia, Parte II: Propriedades físicas dos refratários e fatores operacionais. **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, n. 348, p. 459-464, Out./Dec. 2012. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

CHESTERS, J. H. Magnesite. In: _____ **Refractories**: production and properties. London: Iron and Steel Institute, 1973. cap. 3, p. 118-173. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

CUNHA-DUNCAN, F.N.; BRADT, R. C. Fratura de Refratários. **Cerâmica**, São Paulo, v. 49, n. 312, p. 199-215, Out./Dec. 2003. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

DEDAVID, B. A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura**: aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 18 de jun. 2015.

ECKSTEIN, W.; ZETTL, K. M.; WAPPEL, D. ANKERHARTH – 50th Anniversary of Electric Arc Furnace Bottom Ramming Mixes. **RHI Bulletin – Steel Edition**. Viena: RHI AG, 2013.

ENCICLOPÆDIA BRITANNICA. **Electric Furnace**. 2016. Disponível em: < <http://global.britannica.com/technology/electric-furnace> >. Acesso em: 3 de mai. 2015.

FALCONI, V. C. **Tecnologia de fabricação do aço líquido**. Belo Horizonte: UFMG, 1980.

FERREIRA, J. P. **Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em painéis de aço na produção de aços ao carbono**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/71698/000878473.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 3 de mai. 2015.

FIGUEIRA, R. M. **ACI 504: Operação do FEA**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2007.

GUMIERI, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. 2002. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2652/000323843.pdf?sequence=1> >. Acesso em 3 de mai. 2015.

JANSSON, S.; BRABIE, V.; JÖNSSON, P. Corrosion mechanism and kinetic behaviour of MgO-C refractory material in contact with CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO slag. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 283-292, Oct. 2005.

JOHN, A.L. **Melhoria no Desempenho dos Injetores Supersônicos em Operação em um Forno Elétrico a Arco**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18597/000730827.pdf?sequence=1> >. Acesso em: 3 de mai. 2015.

JONES, P. T. **Degradation Mechanisms of Basic Refractory Materials During the Secondary Refining of Stainless Steel in VOD Ladles**. 2001. 242 f. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas) - Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, 2001. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

LEE, W.E.; MOORE, R. Evolution of *in Situ* refractories in the 20th century. **Journal of the American Ceramic Society**, [S. l.], v. 81, n. 6, p. 1385-1410, Jun. 1998. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

LEE, W.E.; ZHANG, S. Melt corrosion of oxide-carbon refractories. **International Materials Review**, Sheffield, v. 44, n. 3, p. 77-104, 1999. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

_____. Direct and indirect slag corrosion of oxide and oxide-c refractories. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SLAG, 7., 2004, Johannesburg. **Session 6B: Refractories**. Johannesburg: Camera Press, p. 309 - 319. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

LOBATO, E. **Relatório Técnico 71: Cadeia de Refratários**. Brasília: MME (Ministério de Minas e Energia), 2009. 22 f. Projeto ESTAL: projeto de assistência técnica ao setor de energia.

LUZ, A. P.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo Revisão: atuação dos antioxidantes em refratários contendo carbono. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 328, p. 334-344, Out./Dez. 2007. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

LUZ, A. P. *et al.* Avaliação do molhamento da matriz de um concreto refratário (Al₂O₃, SiC, SiO₂, C) por escórias sintéticas contendo diferentes teores de MgO. **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, n. 346, p.144 -150, Abr./Jun. 2012. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

MARQUES, L. R. **Avaliação técnica e microestrutural entre tijolos dolomíticos de alto desempenho para a indústria siderúrgica**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em:< <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/60669/000863119.pdf?sequence=1> >. Acesso em: 3 de maio. 2015.

MATHUR, P.; MESSINA, C. Praxair CoJet™ Technology - Principles and Actual Results from Recent Installations. **AISE Steel Technology**, Danbury, v. 78, n. 5, p. 21-25, Mat/2001. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

MOURÃO, M. B (Coord). **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2007.

NORTON, F. H. **Refractories**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1949.

PRETORIUS, E. **Fundamentals of EAF and Ladles Slags and Ladles Refining Principles**: introduction to slag fundamentals. [S. l.]: Process Technology Group – LWB Refractories, 1996. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

REED, J. S. **Principles of Ceramic Processing**. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

RHI BULLETIN: THE JOURNAL OF REFRACTORY INNOVATIONS. Viena, Austria: RHI, 2013. Disponível em:< http://www.rhi-ag.com/linkableblob/internet_de/88772/data/mr_services_bulletin_1_2015_steel_en-data.pdf >. Acesso em: 3 de maio. 2015.

RIGAUD, M. (1995). New additives in carbon bonded refractories. In: World Ceramics Congress and Forum on New Materials, 8., 1994, Florença. **Ceramics: charting the future**. Florença: TECHNIA Srl, 1995, p. 399-414. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

RIZZO, E. M. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

ROSSI, D. **Influência da Proporção Entre as Vazões de Oxigênio e Gás Natural do Sistema de Injeção na Eficiência Energética de um Forno Elétrico a Arco**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114957/000955762.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 3 de mai. 2015.

SADRNEZHAAD, S. K *et al.* Oxidation Mechanism of C in MgO-C Refractory Bricks. **Journal of the American Ceramic Society**, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 1306-1316, Feb. 2006. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

_____. Effect of Al Antioxidant of the Rate of Oxidation of Carbon in MgO-C Refractory. **Journal of the American Ceramic Society**, [S. l.], v. 90, n. 2, p. 509-515, Jan. 2007. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

SCHACHT, C. A. **Refractories Handbook**. New York: Marcel Dekker, 2004.

SEGADÃES, A. M. **Refractários**. Aveiro, Portugal: Fundação João Jacinto de Magalhães, 1997.

SILVA, G. F. Refratários para a siderurgia. In: MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2007. cap. 9.

TOMBA MARTINEZ, P. T. Sintering Behavior of Periclase-doloma Refractory Mixes. **Journal of the European Ceramic Society**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 581 – 586, Mar. 2009. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

VILELA, A. C. **Caderno Técnico de Siderurgia II-A**. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

YEPREM, A. (2007). Effect of iron oxide addition on the hydration resistance and bulk density of doloma. **Journal of the European Ceramic Society**, [S. l.], v. 27, n. 2-3, p. 1651-1655, 2007. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Neto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Luiz Carlos Pinta da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO (PPGE3M)

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Coordenador substituto: Afonso Reguly

Mattiello, Jakson
ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO
OPERACIONAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES REFRAATÓRIOS
UTILIZADOS EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO / Jakson
Mattiello. -- 2016.
100 f.

Orientador: Saulo Roca Bragança.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre,
BR-RS, 2016.

1. Refratários. 2. Aciaria. 3. Forno Elétrico a
Arco. I. Roca Bragança, Saulo, orient. II. Título.