

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

Luciano Ramos Marques

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E MICROESTRUTURAL ENTRE
TIJOLOS DOLOMÍTICOS DE ALTO DESEMPENHO PARA A
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Porto Alegre
agosto 2012

LUCIANO RAMOS MARQUES

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E MICROESTRUTURAL ENTRE
TIJOLOS DOLOMÍTICOS DE ALTO DESEMPENHO PARA A
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Acadêmico, com concentração em Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança

Porto Alegre
agosto 2012

LUCIANO RAMOS MARQUES

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E MICROESTRUTURAL ENTRE
TIJOLOS DOLOMÍTICOS DE ALTO DESEMPENHO PARA A
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada como para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, agosto de 2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Zimmer

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Caio Marcelo Marques

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M -Dr. pela Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen

Dedico este trabalho a meus pais, Pedro (*in memoriam*) e Neida, minha esposa Patrícia, que sempre me apoiaram e especialmente estiveram do meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a construir este trabalho, em especial aos meus colegas da Aciaria, a célula Laboratório do DQ, aos integrantes do Comitê Técnico de Refratários do Grupo Gerdau.

Agradeço ao Prof. Dr. Saulo Roca Bragança, orientador deste trabalho, pela dedicação e empenho, ao PPGE3M e o LACER, os quais me apoiaram com ensaios laboratoriais e literatura de apoio.

Agradeço a família Jou pela orientação e apoio que tanto me ajudaram a vencer os desafios que a mim foram impostos até o momento.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”

Albert Einstein

RESUMO

MARQUES, L. R. **Avaliação técnica e microestrutural entre tijolos dolomíticos de alto desempenho para a indústria siderúrgica.** 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais –PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

O refratário dolomítico é amplamente utilizado como revestimento de trabalho para painéis no processo de Aciaria, por sua excelente refratariedade em condições de serviço, principalmente em usinas que produzem aços acalmados ao silício. O emprego deste refratário é em virtude de uma formação natural de uma capa protetora, a qual potencializa a vida do refratário, acarretando em um aumento da vida útil do equipamento.

O trabalho baseia-se em um estudo comparativo entre dois tijolos dolomíticos nomeados aqui como tijolos A e B. Os testes em escala industrial foram dados pela montagem de seis revestimentos, de cada tijolo, colocados sob as mesmas condições, monitorando-se a temperatura e o grau de oxidação do banho metálico. Ao final da campanha da panela se realizou alguns testes *POST MORTEM*, onde se destaca as medidas dos residuais.

Além disso, para completar este estudo comparativo, separaram-se tijolos novos de cada marca, os quais foram submetidos às análises microestruturais via MEV, análises termogravimétricas, análises químicas por EDS e DRX, entre outros ensaios.

Os resultados mostraram que o tijolo A teve um desempenho 20% superior ao tijolo B. O tijolo A tem maior pureza, microestrutura com agregados arredondados, com maior homogeneidade, uma ótima distribuição entre partículas finas e médias, favorecendo o empacotamento o que justifica sua maior tenacidade à fratura e resistência à corrosão. Também foi evidenciada de forma clara a presença de carbono grafite no tijolo A, conferindo-lhe uma maior resistência ao choque térmico e à corrosão.

Palavras-chave: refratário, dolomítico, propriedades, microestrutura.

ABSTRACT

MARQUES, L. R. **Avaliação técnica e microestrutural entre tijolos dolomíticos de alto desempenho para a indústria siderúrgica.** 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais –PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

The refractory dolomite is widely used as coating for ladles work in steelmaking process for its excellent refractoriness in terms of service. The use of this refractory is due to a natural formation of a protective layer, which enhances the life of the refractory, resulting in increased equipment life.

This work is based on a comparative study between two bricks dolomite named here as A and B. Tests were given on an industrial scale by assembling six coatings of each brick placed in the same conditions by monitoring the temperature and the degree of oxidation of the metal bath. At the end of the campaign applied some tests POST MORTEM, how measurements of residual stresses.

Moreover, to complete this comparative study, separated from each brand new bricks, which were subjected to microstructural analyzes via MEV, thermogravimetric analysis, chemical analysis by EDS and XRD, among other tests.

The results showed that the performance of brick A was 20% higher than brick B. The Brick A has a higher purity, microstructure with rounded aggregates with greater homogeneity, optimal distribution between fine and medium particles, favoring the packaging which justifies a higher fracture toughness and corrosion resistance. It was also clearly evidenced the presence of graphitic carbon in the brick A, giving it a higher resistance to thermal shock and corrosion.

Key-words: refractory, dolomite, requirements, microstructure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade instalada x produção x consumo aparente de aço bruto	14
Figura 2 – Diagrama de fase binário CaO – MgO.....	16
Figura 3 – Classificação de materiais industriais para Engenharia, destacando-se os materiais refratários e algumas de suas subdivisões.	21
Figura 4 – Microestruturas típicas de materiais refratários	21
Figura 5 – Evolução da produtividade e consumos específicos com o avanço tecnológico em siderurgia ao longo dos anos.	22
Figura 6 – Ciclo Operacional de Painela em uma Aciaria Elétrica.	23
Figura 8 – Formatos Padronizados de Tijolos Refratários. (a) Arcos, (b) Cunhas, (c) Radiais, (d) Circular.	25
Figura 9 – Revestimento Refratários na Painela.....	27
Figura 7 – Ciclo da painela com aço e sem aço.....	28
Figura 10 – Condutividade térmica dos óxidos pela temperatura.	34
Figura 11 – Lascamento do revestimento (Spalling).....	35
Figura 12 – Efeitos de aquecimentos e resfriamentos bruscos em materiais refratários.....	35
Figura 13 – Diagrama de fases ternário (CaO-SiO ₂ -MgO)	37
Figura 14 – Diagrama Binário CaO – SiO ₂	38
Figura 15 – Diagrama Binário MgO-SiO ₂	39
Figura 16 – Coeficiente de dilatação térmico pelo aumento da temperatura: (a) MgO e CaO e (b) Fase C ₂ S (Ca ₂ SiO ₄).....	40
Figura 17 – Relação entre basicidade CaO/SiO ₂ e coeficiente de bipartição do enxofre.	41
Figura 18 – Efeito da adição de CaF ₂ no diagrama de fase ternário a 1600°C.....	42
Figura 19 – Diagramas de fase: (a) CaO-FeO, (b) CaO-Fe ₂ O ₃	43
Figura 20 – Diagramas de fase: (a) MgO-FeO, (b) MgO-FeOFe ₂ O ₃	43
Figura 21 – Ataque da escória no agregado dolomítico	44
Figura 22 – Degradação do refratário dolomítico pelo ataque da escória.....	44
Figura 23 – Molhabilidade de um Substrato. (a) Não molha. (b) Molha	45
Figura 24 – Tipos de desgaste mecânico	46
Figura 25 – Curva de aquecimento do revestimento refratário dolomítico.....	48
Figura 26 – Desenho esquemático da montagem da painela.....	51
Figura 27 – Gráfico do perfil de desgaste por fiada de ambos os revestimentos	56
Figura 28 – Diferença entre a vida útil entre os revestimentos	56

Figura 29 – Temperatura do aço na chegada ao forno panela – tijolo A.....	58
Figura 30 – Temperatura do aço na chegada ao forno panela – tijolo B.....	58
Figura 31 – Temperatura do aço na saída do forno panela – tijolo A.	59
Figura 32 – Temperatura do aço na saída do forno panela – tijolo B.....	59
Figura 33 – Escória no forno panela – tijolo A	60
Figura 34 – Escória no forno panela – tijolo B.....	61
Figura 35 – % FeO+%MnO Escória do forno panela – tijolo A.....	61
Figura 36 – % FeO + %MnO Escória do forno panela – tijolo B	62
Figura 37 – Visão geral da microestrutura (tijolo A)	64
Figura 38 – Visão geral da microestrutura (tijolo B).....	64
Figura 39 – Aspecto dos agregados (tijolo A).....	65
Figura 40 – Aspecto dos agregados em maior magnitude (tijolo A).....	65
Figura 41 – Aspecto dos agregados (tijolo B)	66
Figura 42 – Aspecto dos agregados em maior magnitude (tijolo B).....	66
Figura 43 – Presença de partícula eletrofundida (tijolo A)	67
Figura 44 – Detalhe de partícula eletrofundida em elevada magnitude (tijolo A)	67
Figura 45 – Presença de partícula eletrofundida (tijolo B).....	68
Figura 46 – Detalhe de partícula eletrofundida. (tijolo B)	68
Figura 47 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise pontual via EDS.....	70
Figura 48 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise pontual via EDS (tijolo B)	71
Figura 49 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise da região selecionada, via EDS (tijolo B).....	71
Figura 50 – Análise da microestrutura via EDS (tijolo A).....	72
Figura 51 – Análise da microestrutura via EDS (tijolo B)	72
Figura 52 – Distribuição de ferro e silício na microestrutura (tijolo A).....	73
Figura 53 – Distribuição de ferro e silício na microestrutura (tijolo B).....	74
Figura 54 – Análises das fases por difração de raios X para os tijolos A e B.....	75
Figura 55 – Análise termogravimétrica.....	76
Figura 56 – Análise térmica diferencial.	76
Figura 57 - Descarboxinação dos tijolos em atmosfera oxidante.....	77
Figura 58 - Teste de descarboxinação do tijolo	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ficha técnica dos materiais	50
Tabela 2 – Taxa de desgaste entre os tijolos	55
Tabela 3 – Resumo do acompanhamento das temperaturas em (°C)	57
Tabela 4 – Resumo do acompanhamento da escória do FP entre fornecedores.....	60
Tabela 5 – Composição do ponto 2, na Fig. 47. Tijolo A	69
Tabela 6 – Composição do ponto 1, na Fig. 48	70
Tabela 7 – Composição da região 1, na Fig. 49	70

LISTA DE SIGLAS

DQ – Desenvolvimento da qualidade.

DRX – Difração de raios X.

DTA – *Diferencial Termic Analises.*

EDS – *Energy dispersive spectroscopy.*

EDX - *Energy dispersive X-ray*

FEA – Forno elétrico a arco.

FP – Forno Panela.

ICDD - International Centre for Diffraction Data.

LACER – Laboratório de cerâmicos.

LC – Lingotamento contínuo.

MEV – Microscópio eletrônico de varredura.

PPGE3M – Programa de pós-graduação Minas, Metalúrgica e Materiais.

T_f – Temperatura de fusão.

TGA – *Termogravimetric analises*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{st} – Parâmetro de estabilidade de uma trinca, expressando a resistência ao choque térmico do material.

γ_{wof} – Energia total da fratura.

α – Coeficiente linear de dilatação térmica.

E – Módulo de elasticidade do material.

π – Valor constante e igual 3,14.

r – Diâmetro interno do revestimento;

L – Comprimento ao lado reto da carcaça metálica (zero para painéis cilíndricos).

D – Altura de escória em função do comprimento do arco elétrico.

$\rho^{\text{escória}}$ – Densidade da escória.

$\ln\%S$ – Logarítimo natural do teor de enxofre presente no banho metálico.

$\ln a_{MS}$ – Logarítimo natural da atividade do sulfeto metálico presente no banho.

$\ln f_S$ – Logarítimo da fugacidade do elemento enxofre presente no banho metálico.

$\ln a_{MO}$ – Logarítimo natural da atividade do óxido metálico presente na escória.

R – constante dos gases ideais.

T – Temperatura.

μ_{O_2} – Potencial de oxigênio.

ΔG°_S – Energia livre padrão do elemento enxofre.

ΔG°_O – Energia livre padrão do elemento oxigênio.

$(\%S)$ – Teor de enxofre presente na escória.

[%S] – Teor de enxofre presente no banho metálico.

γ_{SL} – Tensão superficial sólido – líquido.

γ_{SG} – Tensão superficial sólido – gás.

γ_{LG} – Tensão superficial líquido – gás.

θ – Ângulo de contato.

Tx – Taxa média de desgaste.

A_i – Espessura inicial do tijolo.

A_f – Espessura final do tijolo (residual).

NC – Número de corridas da campanha do revestimento.

SUMÁRIO

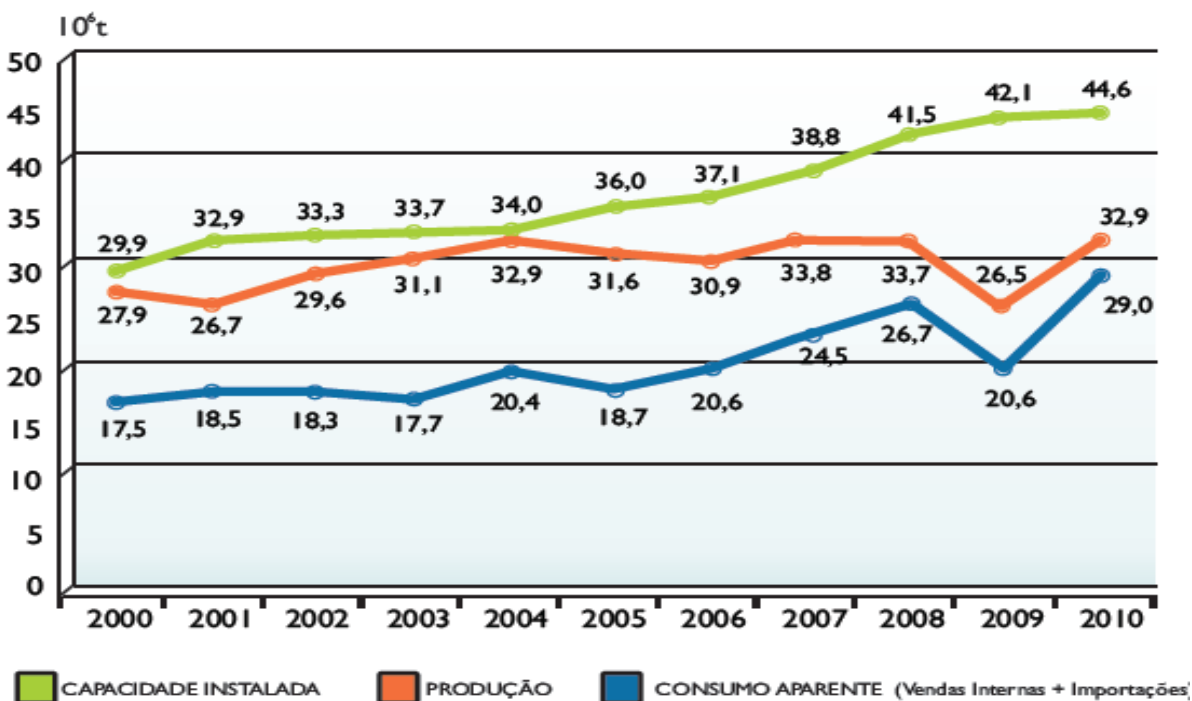
1 INTRODUÇÃO.....	14
2.1 RELEVÂNCIA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
2.2.1 Objetivo Principal.....	17
2.2.2 Objetivos Específicos	17
2.3 LIMITAÇÕES.....	18
2.4 DELIMITAÇÕES	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 OS REFRAATÓRIOS SOB A ÓTICA DA CIÊNCIA DOS MATERIAIS.....	20
3.2 BREVE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE REFINO DO AÇO.....	22
3.3 REFRAATÓRIOS UTILIZADOS EM PANEAS DE ACIARIAS ELÉTRICAS	24
3.3.1 Montagem dos revestimentos refratários.....	24
3.3.2 Tipos de revestimentos e suas regiões de montagem.....	25
3.4 MECANISMOS DE DESGASTE TÉRMICO DOS REFRAATÓRIOS	28
3.5 DESGASTE TERMOQUÍMICOS DOS REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS	36
3.6 DESGASTES POR ABRASÃO OU EROSÃO DOS REFRAATÓRIOS	46
3.7 DESGASTES TERMOMECAÑICOS DOS REFRAATÓRIOS	46
3.8 MONTAGEM DAS PANEAS.....	47
3.9 CICLO DAS PANEAS	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 MATERIAIS	50
4.2 MÉTODOS.....	50
4.2.1 Análise de residual	50
4.2.2 Análise no MEV (Microscópio eletrônico de Varredura).....	52
4.2.3 Análise DRX (análise de difração por raios-x).....	52
4.2.4 Análises térmicas (TGA/DTA).....	53
4.2.5 Montagem e monitoramento.....	53
4.2.6 Taxa de oxidação.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 ANÁLISES DE RESIDUAIS (<i>POST MORTEM</i>).....	55
5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL COMPARATIVA ENTRE TIJOLOS REFRAATÓRIOS A E B	62
5.2.1 Análise geral da qualidade dos agregados e matriz	63
5.2.2 Investigação da pureza dos refratários: análise da composição química via EDS.....	69
5.2.2.1 Impurezas Pontuais.....	69
5.2.2.2 Mapeamento	72
5.3 ANÁLISE DAS FASES POR DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	74
5.4 ANÁLISES TÉRMICAS.....	76
5.5 ANÁLISES DA TAXA DE OXIDAÇÃO	77
6 CONCLUSÕES.....	78
6.1 QUANTO À MEDIÇÃO DO RESIDUAL DE PANEAS	78

6.2 QUANTO À CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS	78
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O consumo de refratários é inerente ao processo de fabricação de aço, de modo que as indústrias siderúrgicas têm tentado maximizar o desempenho destes materiais no processo produtivo a fim de se obter menores custos de produção. Isto é visível dentro do novo cenário da siderurgia nacional, foram feitos investimentos no Brasil visualizando uma demanda, a qual ainda não foi concretizada, gerando uma ociosidade no parque produtivo. Em consequência deste fator econômico, várias iniciativas foram tomadas para a sobrevivência das empresas neste mercado competitivo, como por exemplo, operações trabalhando através do conceito *Just in time*, como pode se perceber pela figura 1 (aderência entre as curvas produção e consumo aparente). Além disso, a figura 1 mostra a capacidade instalada de produção de aço no Brasil, permitindo ao setor siderúrgico atender plenamente ao mercado interno e exportar mais 30% da produção.

Figura 1 – Capacidade instalada x produção x consumo aparente de aço bruto



(fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011)

Através do cenário econômico, as empresas têm lutado para aperfeiçoar seu desempenho na produção, com o objetivo de minimizar os custos do produto final e, assim, garantir sua

competitividade no mercado. As empresas têm feito investimentos, de parte de suas receitas, em conhecimento tecnológico para gerar conhecimento técnico à corporação e se garantir no mercado global atual. Segundo Nakahara (1997) o avanço tecnológico dos materiais refratários aplicados, tem-se como resultado o aumento da vida útil dos refratários, correlacionado com uma significativa redução de custos e a segurança operacional nos processos siderúrgicos.

Desta forma, a exigência em desempenho dos materiais refratários utilizados em siderurgia torna-se cada dia mais elevada. Um equipamento, o qual é afastado do ciclo produtivo para uma manutenção refratária, seja porque sua vida útil foi reduzida devido ao desgaste em trabalho ou pelo final de vida útil, oneram os custos relativos de consumo, bem como interrompe o ciclo energético por encharque térmico destes materiais, implicando gastos em reaquecimento e, por fim, destinação para aterros os resíduos refratários.

A utilização de refratários, os quais proporcionam segurança operacional, vida útil elevada e relação custo-benefício otimizada e etc., são alguns dos objetivos das empresas do ramo siderúrgico na busca da sustentabilidade diante deste cenário econômico. Estas iniciativas geram valor para empresa, através da redução dos custos e otimização dos lucros e, também, reduzem o impacto ao meio ambiente uma vez que se destina menos material de rejeito.

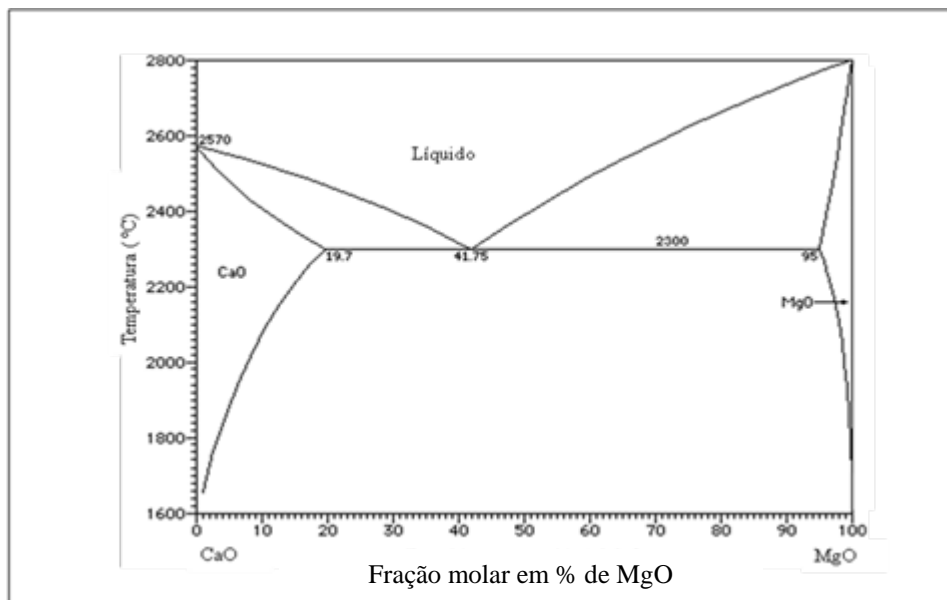
A escolha de um material refratário que tenha alta performance durante a aplicação nem sempre é uma tarefa simples. Segundo Coutinho (1986), a seleção dos materiais refratários para revestimento de painéis de aço vai ser definida a partir da análise de suas propriedades de interesse tecnológico.

Na maioria das aciarias elétricas acalmadas ao silício utilizam revestimento dolomíticos devido a sua relação custo benefício otimizada. Os refratários dolomíticos são uma mistura de óxidos CaO e MgO, sendo que sua alta refratariedade é explicada pelo fato do óxido duplo apresentar temperatura de fusão (T_f) acima de 2300°C, conforme pode ser visto na figura 2.

A matéria prima do refratário dolomítico é a dolomita ($MgCO_3CaCO_3$), cujo a composição ideal para o seu processamento é de 54% de $CaCO_3$ e 46% $MgCO_3$. Para que ocorra o processamento da dolomita, este material é aquecido a uma faixa de temperatura de 650 a 700°C, tendo como produto o óxido $MgOCaCO_3$. Posteriormente este produto é submetido a um novo aquecimento 850°C a 900°C onde o produto é o óxido $MgOCaO$, ou simplesmente

doloma. Em seguida se dá o processo de sinterização, onde ocorre o aquecimento da doloma a 1800°C a 2200°C. O objetivo da sinterização é o aumento da densidade, redução da porosidade e, principalmente o aumento de resistência à hidratação. A doloma hidrata devido ao fato de quando é submetida a temperaturas inferiores a 600°C a energia livre do material hidratado ($\text{MgO} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$) é menor do que a energia livre da doloma, ou seja, a doloma hidratada é mais estável. Assim, como a doloma é altamente higroscópica, inicialmente os fornecedores de refratários desenvolveram a prática de adicionar carbono ligante a estes dois óxidos, buscando uma maior resistência a hidratação. Assim, através desta prática de adição do carbono ligante, obteve-se um aumento da vida do revestimento devido aos baixos índices de molhabilidade da escória ao tijolo, reduzindo assim a sua degradação quando em serviço. Além disso, os refratários contendo carbono têm sido tipicamente selecionados tomando como base a sua superior condutividade térmica. Por essas razões, é importante uma avaliação das principais propriedades dos refratários, visando não apenas estabelecer critérios de seleção, mas também, permitir à engenharia de projetos efetuarem modificações na sua microestrutura, possibilitando assim superior desempenho do revestimento.

Figura 2 – Diagrama de fase binário CaO – MgO.



(fonte: LEVIN et al, 1964)

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 RELEVÂNCIA

As propriedades físicas, como porosidade, resistência mecânica e composição química dos refratários são muito semelhantes em refratários de alta qualidade. Assim, o que vai ditar o desempenho do refratário serão as características microestruturais dos mesmos, tais como: tamanho e distribuição de grãos/partículas, ligantes, teor e tipo de carbono, etc. Entretanto, estas informações dificilmente são detalhadas pelos fornecedores de refratários, de modo que os clientes carecem de informações mais precisas para relacionar e explicar diferenças no desempenho destes refratários em serviço. Logo, devido cenário econômico, somado a importância em deter o conhecimento sobre a tecnologia dos materiais refratários dolomíticos, surgiu o propósito do presente trabalho.

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo do presente trabalho é dirigir um estudo comparativo entre dois refratários dolomíticos, para compreender a influência das propriedades e microestrutura do refratário no desempenho deste, quando aplicado em uma panela de aço, numa aciaria elétrica acalmada ao silício. Por meio deste estudo, espera-se propiciar à comunidade uma metodologia de análises e dados, os quais os ajudem à seleção de refratários, com o principal objetivo aumentar a vida útil do revestimento.

2.2.2 Objetivos Específicos

- a) caracterização técnica e microestrutural dos refratários dolomíticos, explicitando os fatores e propriedades relevantes de um refratário, em relação ao seu desempenho;

- b) avaliação da espessura de residual dos tijolos, como forma de avaliar o desempenho dos mesmos;
- c) dirigir uma pesquisa detalhada de práticas operacionais que faça potencializar a vida de panela com o uso de revestimento dolomítico;
- d) entender as limitações do processo para desenvolver revestimentos que atenda às solicitações em serviço, sem aumentar os custos de produção. Correlacionar estas limitações do processo com as propriedades requeridas, com foco em se obter maior resistência à corrosão, monitorando as questões químicas da escória correlacionadas ao desgaste do revestimento.

2.3 LIMITAÇÕES

Como se trata de um material refratário dolomítico deve-se realizar análises com todos os cuidados no manuseio desta amostra, a fim de evitar a hidratação, o que nem sempre é possível na prática industrial. A aciaria elétrica que irá operar com os revestimentos em estudo possui dois fornos elétricos a arco, os quais operam com tipos diferentes de aços e com graus de oxidação diferentes. Como existe uma dificuldade muito grande em manter uma panela cativa para um único forno, deve-se desenvolver uma metodologia de acompanhamento de modo a garantir que ambos os revestimentos sejam submetidos às mesmas condições de trabalho, a fim de garantir os resultados comparativos entre os tijolos. A temperatura de processamento e tempo de residência do aço no interior da panela também são fatores que contribuem, assim como escória, ao desgaste do material refratário, limitando a vida útil do revestimento. Sendo assim, para evitarmos interferências no presente estudo, às panelas a serem comparadas, deve ter preferencialmente:

- a) mesmo projeto de montagem;
- b) mesma equipe e mesmo padrão de montagem;
- c) mesmo regime de operação: tempo de residência de aço no interior da panela similar;
- d) temperatura de processamento do aço similar;
- e) escória de metalurgia secundária similar;
- f) grau de oxidação do aço parecido, assim como, tipo de desoxidante igual;
- g) padronização na desoxidação e correção da viscosidade da escória

2.4 DELIMITAÇÕES

Para se alcançar os objetivos do presente trabalho, faz-se necessários algumas delimitações, como por exemplo:

- a) Garantir que a montagem dos revestimentos seja realizada pela mesma equipe e que tenha supervisão para liberá-la para o trabalho;
- b) O ciclo de aquecimento seja seguido à risca conforme os padrões de trabalho;
- c) Seleccionadas duas carcaças metálicas e revesti-las com refratário de segurança novo para não interferir no resultado;
- d) Manter as duas painéis, de diferentes fornecedores, na sequência de vazamentos, para diminuir a interferência das solicitações termoquímicas.
- e) Sempre que for realizar a manutenção de um revestimento de trabalho (montar um revestimento novo, sem trocar o permanente), separar um tijolo novo da linha de escória para a análise em laboratório.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OS REFRAATÓRIOS SOB A ÓTICA DA CIÊNCIA DOS MATERIAIS

A ciência dos materiais tem por objetivo estudar a relação entre microestrutura e propriedades, correlacionando com o modo de fabricação e desempenho frente às condições de serviço.

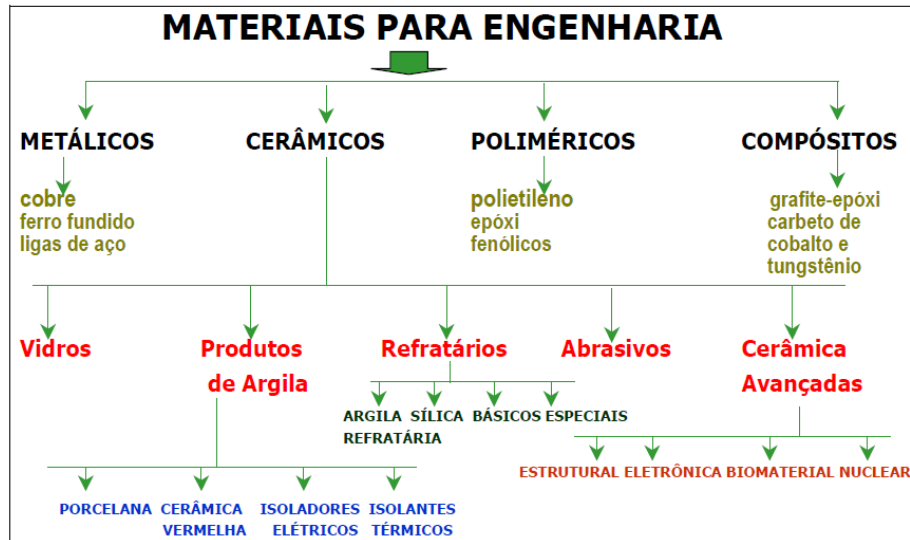
Estas condições de serviço, as quais serão submetidas o material refratário, deve-se combinar com suas respectivas propriedades requeridas para tal aplicação. Em se tratando de refratários para painéis dolomíticos, são exigidas as seguintes propriedades: alta refratariedade (temperatura máxima de serviço em que o refratário resiste sem perder suas propriedades estruturais), resistência ao choque térmico, resistência à oxidação, bem como resistência mecânica a interações com metal, escórias, gases e etc.

A classificação dos materiais está interligada pela forma os átomos se arranjam em uma estrutura cristalina e, isso, explicam-se muitas das propriedades de interesse tecnológico tais como: resistência mecânica e térmica (termomecânicas), exemplificada pela fluência e condutividade térmica. A microestrutura do material, definido pelo o arranjo das fases, (incluindo as porosidades), tamanho, forma e orientação destas fases, definem várias grandezas específicas do material e é fator muito significativo durante a sua modificação em serviço.

A maioria dos materiais são polifásicos, ou seja, mais de uma fase está presente na microestrutura, contendo cada fase, tanto arranjo atômico, como propriedades distintas. A união destas fases presentes em um material constitui sua microestrutura. Ao analisar uma microestrutura deve-se levar em consideração que tipo, proporção, forma, distribuição, orientação e tamanho das fases coexistentes na microestrutura. Estas características referentes à microestrutura estão associadas às propriedades destes materiais e, assim, estão ligadas também ao desempenho que apresentará quando submetida ao serviço. A presença de fases vítreas contribui muito significativamente no comportamento termomecânico do material em serviço. As figuras 3 e 4 mostram os diferentes tipos de estruturas (a classificação dos

materiais utilizados em engenharia) e as microestruturas típicas destes materiais, respectivamente.

Figura 3 – Classificação de materiais industriais para Engenharia, destacando-se os materiais refratários e algumas de suas subdivisões.



(fonte:GERDAU, 2008, p. 19)

Figura 4 – Microestruturas típicas de materiais refratários

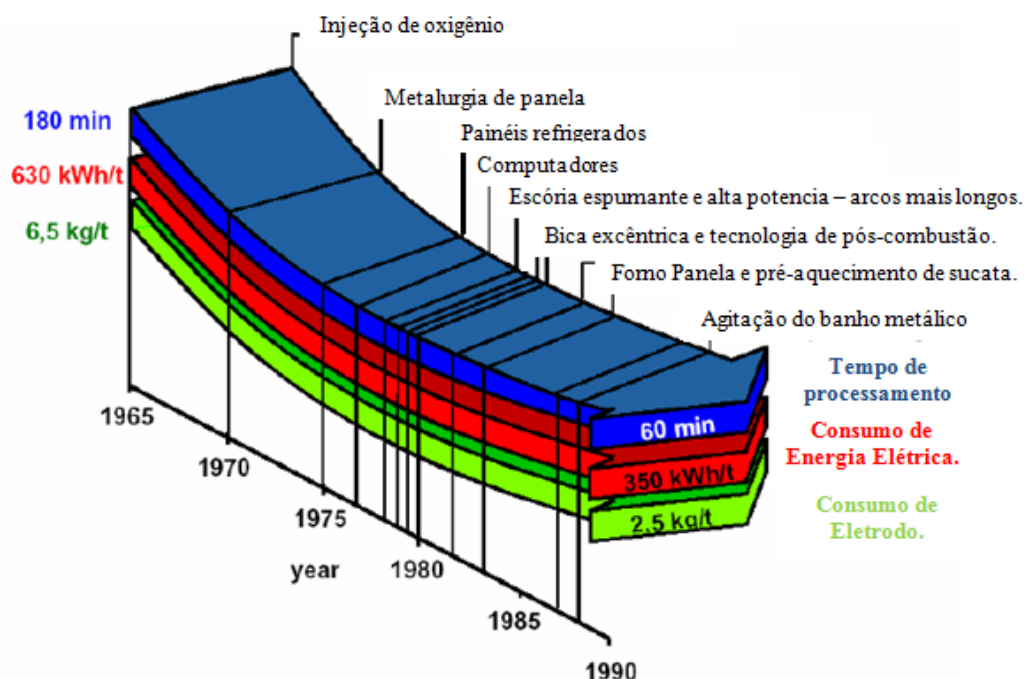
1		Material contendo uma fase cristalina, sem fase vítrea e poros. Visível o efeito de tensão.	8		Material como o da microestrutura 2, mas composto por grãos policristalinos.																		
2		Material como o da microestrutura 1, contendo poros dentro dos grãos.	9		Material contendo uma fase cristalina com dois tamanhos, composto de uma matriz vítrea cristalina. Dois tipos de poros.																		
3		Material como o da microestrutura 1, contendo poros no contorno de grão.	10		Material com uma fase cristalina contendo poros dentro dos grãos, composto com matriz vítrea.																		
4		Material contendo duas fases cristalinas e poros dentro dos grãos.	11		Material com uma fase cristalina, composta com matriz vítrea. Poros dentro da matriz.																		
5		Material como o da microestrutura 4 contendo poros no contorno de grão e cristalização hipoeutética dentro do grão.	12		Material como o da microestrutura como 11, mas com segunda fase em forma de bastonetes e grãos idiomórficos																		
6		Material contendo duas fases cristalinas e poros no contorno de grão. Surgimento de uma segunda fase de composição eutética.	13		Material como o da microestrutura em 12, mas com segunda fase em forma de agulhas e poros no contorno de grão da fase vítrea.																		
7		Material como o da microestrutura 6, com uma terceira fase cristalina. Contém poros dentro dos grãos.	14		Material contendo duas fases cristalinas e poros, composição com fase vítrea (mais de 50% em vol.)																		
<table border="0"> <tr> <td></td> <td>– fase vítrea</td> <td></td> <td>– primeiro cristal</td> <td></td> <td>– poros</td> </tr> <tr> <td></td> <td>– policristal</td> <td></td> <td>– segundo cristal</td> <td></td> <td>– estrutura lamelar eutética</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>– efeito de tensão</td> </tr> </table>							– fase vítrea		– primeiro cristal		– poros		– policristal		– segundo cristal		– estrutura lamelar eutética						– efeito de tensão
	– fase vítrea		– primeiro cristal		– poros																		
	– policristal		– segundo cristal		– estrutura lamelar eutética																		
					– efeito de tensão																		

(fonte: GERDAU, 2008, p. 23)

3.2 BREVE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE REFINO DO AÇO

Atualmente o forno de fusão, em uma aciaria elétrica, tem por objetivo fundir a carga fria (sucata e carburantes) e desfosforar o aço líquido, sendo que esta etapa é classificada, no meio siderúrgico, como Refino Oxidante ou Refino Primário. A necessidade de liberação do forno fusão foi em virtude de se maximizar a produtividade pelo o aumento de produção (figura 5) e assim fez-se surgir a Metalurgia de Panela ou Refino Secundário, transformando a panela de um simples recipiente de transporte do aço líquido, do forno de fusão ao lingotamento, em um reator de ajuste da composição final do aço. Assim, a panela modificou-se significativamente ao longo do tempo, passando a receber aquecimento (forno panela) e a servir de vaso de reação para operações de dessulfuração, desgaisificação e desoxidação. Isso mudou significativamente a complexidade dos fatores de influência na seleção de materiais refratários que fizessem frente a novas solicitações de serviço para as panelas de aço.

Figura 5 – Evolução da produtividade e consumos específicos com o avanço tecnológico em siderurgia ao longo dos anos.

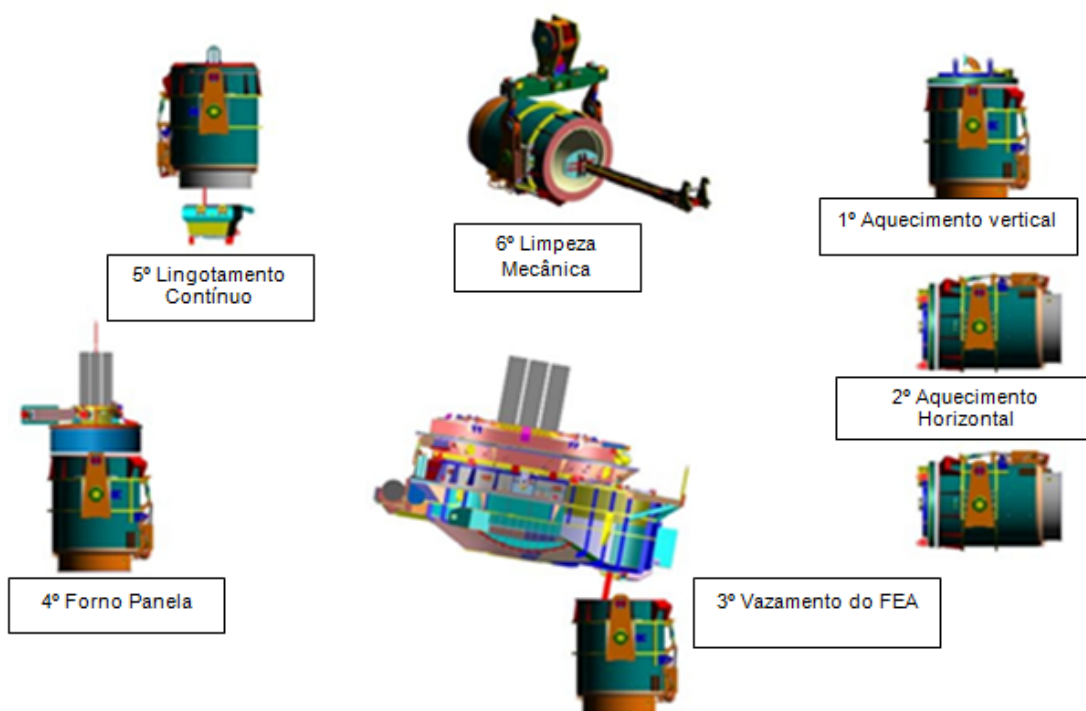


(fonte: cortesia GERDAU S.A.)

A metalurgia de panela fez com que se aumentasse o tempo de residência do aço no interior da panela e este fato contribuiu para a busca de materiais refratários de maior qualidade e compatíveis à escória deste processo.

Segundo Casséte (2000), disse-se que a panela está em ciclo quando o revestimento, previamente aquecido, é submetido ao vazamento no FEA, passa para suas operações subsequentes e o retorna ao próximo vazamento sob as mesmas condições, mantendo-se o revestimento aquecido. Sendo assim, é dito que a panela está em ciclo se o revestimento mantiver-se-se aquecido, incluindo as operações de forno panela, lingotamento contínuo, limpeza, manutenção refratária e posterior aquecimento, se necessário. A vida do revestimento depende intrinsecamente à variação da temperatura, assim, as operações em uma aciaria elétrica devem possuir práticas operacionais que possam manter estes revestimentos refratários o maior tempo possível em ciclo e que mantenha a temperatura do revestimento o mais próximo possível da temperatura de trabalho. O ciclo da panela pode ser melhor visualizado através da figura 6.

Figura 6 – Ciclo Operacional de Panela em uma Aciaria Elétrica.



(fonte: cortesia GERDAU S. A)

3.3 REFRAATÓRIOS UTILIZADOS EM PANEAS DE ACIARIAS ELÉTRICAS

3.3.1 Montagem dos revestimentos refratários

Segundo Coutinho (2000) o projeto técnico de montagem do revestimento refratário consiste desde a especificação do tipo de material a ser utilizado – de acordo com o tipo de solicitação em serviço – até as classes de materiais refratários a serem utilizadas para cada tipo de aplicação, atendendo assim, as especificações técnicas de engenharia e economicamente viáveis para cada equipamento.

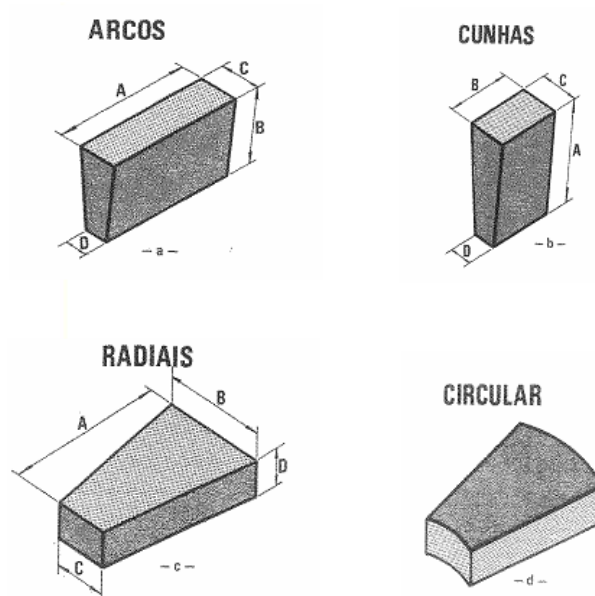
O projeto é concebido a partir das especificações dimensionais das carcaças metálicas, limitações de capacidade volumétrica e tipos de solicitações sobre o revestimento (químico, térmico, mecânico e etc.).

Os revestimentos refratários de paineis de aço se dividem em duas classes: Moldados e Não Moldados. As diversas formas de revestimentos de paineis são projetadas de acordo com a sua carcaça metálica e podem ser subdivididos em:

- a) revestimento plano;
- b) revestimento tronco-cônico;
- c) revestimento esférico;
- d) revestimento em inserções;
- e) revestimento cilíndrico.

Dentre os tijolos (classe moldados), atualmente existe uma série de formatos de tijolos padronizados pelos fabricantes, tais como: radial, arco, cunha e circular. O revestimento em estudo é constituído de tijolos (Moldados) da forma Radial.

Figura 7 – Formatos Padronizados de Tijolos Refratários. (a) Arcos, (b) Cunhas, (c) Radiais, (d) Circular.



(fonte: Seminário ABM Refratários para siderurgia, 2000.

3.3.2 Tipos de revestimentos e suas regiões de montagem

De acordo com Oliveira (2005) as solicitações que sofrem o revestimento refratário são de acordo com cada região e é necessário que o projeto contemple um refratário com propriedades e dimensões compatíveis a estas solicitações.

Os revestimentos moldados se dividem em dois tipos: tijolos de segurança (permanentes) ou tijolos de trabalho (tijolo que fica em contato direto com metal/escória/gases e etc.).

Segundo Casséte (2000) a classe não moldadas denominada *back-fill* (massa que preenche o espaço vazio entre os revestimentos de segurança e o de trabalho), devem ser compatíveis com o tijolo de trabalho e não deve ultrapassar 20 mm de espessura para que garanta suas duas funções básicas: proteger o refratário permanente contra infiltrações de aço ou escória e; não permitir que o revestimento de trabalho se desloque contra a chapa metálica no momento do aquecimento da panela.

O revestimento permanente tem a função de isolar termicamente a panela e proteger a chapa metálica contra a ação do aço ou escória líquida. Normalmente são tijolos queimados de alta alumina nas regiões do fundo da panela e linha de metal e aluminosos associados com básicos

na linha de escória devido à alta temperatura de trabalho desta região (CARVALHO NETO, 1989).

O revestimento de trabalho classificado como LINHA DE METAL é aquele que entra em contato com o aço líquido na maior parte do tempo em que a panela estiver com aço líquido em seu interior. O refratário a ser utilizado nesta região é função de seu desempenho em serviço, vida útil, inerte ao processo de fabricação do aço e de baixo custo.

A parte do revestimento que tem contato com a escória na maior parte do tempo com aço é chamado de LINHA DE ESCÓRIAS. O fator limitante da vida do revestimento de muitas usinas é a linha de escórias dada pela corrosão da escória (CARVALHO NETO, 1989). Devido ao tempo de exposição à ação danosa da escória, nesta região da panela, a linha de escórias tem espessura maior pelo projeto, já que a taxa de desgaste da mesma é maior, em tese. Esta taxa de desgaste maior é explicada devido ao fato das linhas de escórias estarem submetidas a uma maior solicitação de oxidação provocada pela escória e o sobreaquecimento da mesma durante as operações de FP. Em aciarias semi-integradas, com aços acalmados ao silício, os refratários dolomíticos são amplamente utilizados nestas regiões (OLIVEIRA, 2005).

Entre a linha de metal e a linha de escórias é muito comum o projeto de montagem contemplar a LINHA DE TRANSIÇÃO, a fim de aumentar a ancoragem do tijolo da linha de escórias.

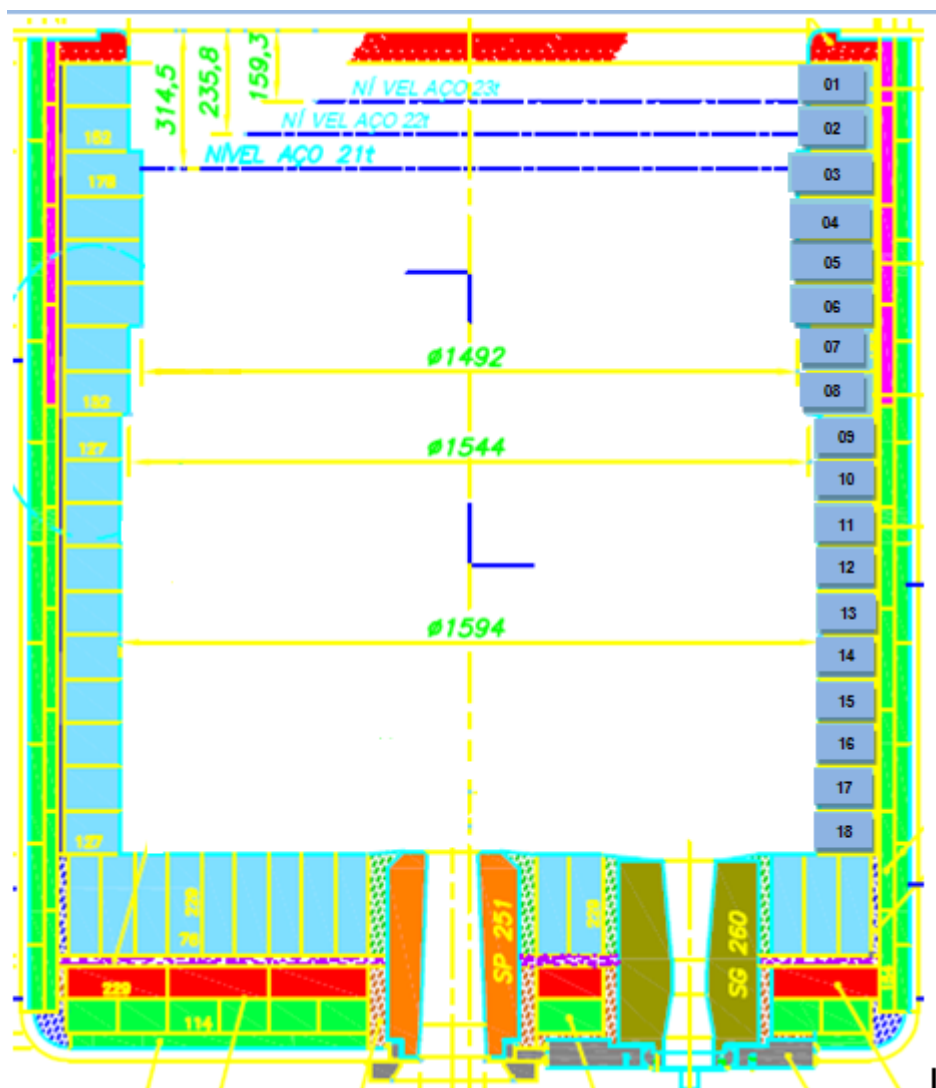
A região da BORDA LIVRE fica acima da linha de escória, sujeita a oxidação, temperaturas elevadas, choques térmicos e ataque químico. Práticas de forno panela podem gerar desgaste por arco elétrico nesta região e limitar a vida da panela. Sendo assim os refratários aluminosos também não são indicados para esta região, sendo muito utilizado o mesmo material da linha de escórias.

No geral, as principais solicitações dos revestimentos de trabalho são: erosão do metal líquido (vazamento do FEA para FP), desgaste mecânico durante a limpeza do revestimento, as variações térmicas durante o ciclo operacional, elevados tempos de residência do aço líquido dentro da panela (principalmente se estiver oxidado).

As sedes de plugs e sede de válvulas passaram a ser objeto de estudo com o avanço da vida do revestimento de trabalho, pois passaram a limitar a vida da panela em ciclo. Estas peças são

pré-moldadas de concreto de baixo cimento, alumina-MgO, alumina-cromo, alumina-espínélio e suas variações.

Figura 8 – Revestimento Refratários na Panela



(fonte: cortesia MAGNESITA S.A.)

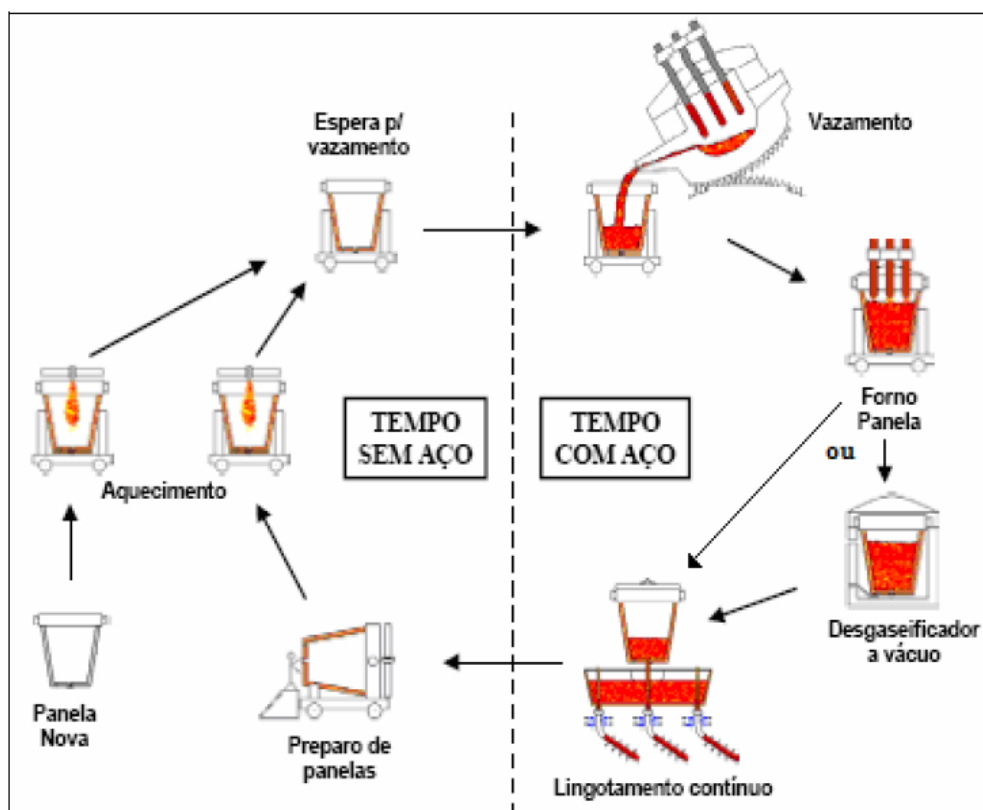
Em resumo, a figura 9 mostra o projeto do revestimento de trabalho em perfil, onde as regiões estão subdivididas em:

- I – LINHA DE METAL: linha 09 a 18;
- II – LINHA DE TRANSIÇÃO: linha 07 e 08;
- III – LINHA DE ESCÓRIA: linha 03 a 06;
- IV – BORDA LIVRE: linha 01 e 02.

3.4 MECANISMOS DE DESGASTE TÉRMICO DOS REFRATÁRIOS

Visualizando a figura 7, observa-se que a panela que está em ciclo operacional pode estar em duas situações distintas: a primeira contendo aço líquido e a outra sem aço (esperando o forno elétrico a arco vaziar a corrida, panela nova ou esperando por um reparo).

Figura 9 – Ciclo da panela com aço e sem aço



(fonte: INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE ¹, 2009 apud ANDRADE, 2009)

Podemos considerar, segundo Schaefer² (1986 apud ANDRADE, 2009) e U.S. Steel³ (1985 apud ANDRADE, 2009), a seguintes definições:

- a) tempo sem aço: é o intervalo de tempo em que a panela está aguardando no fosso de vazamento a espera do final do processamento do refino oxidante

¹ INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, www.IISI.com. acessado em 15/06/09.

² SCHAFER, H. Automatic Arc Furnace Control. **Iron and Steel Engineer**. Arte e Ciência, ago. 1986.

³ U. S. STEEL. The Making, Shaping and Treating of Steel. **Electric Furnace Steelmaking**. Pittsburg: Arte e Ciência, 1985.

(FEA), ou seja, aguardando o próximo vazamento ou, aguardando o aquecimento, manutenção e manuseio de panela;

- b) tempo com aço: compreende ao intervalo de tempo em que o aço reside na panela, desde o vazamento do (FEA), refino secundário ou metalurgia de panela, até o final do lingotamento contínuo.

Uma panela com aço em seu interior passa por solicitações, as quais se destacam: altas temperaturas de trabalho (grandes gradientes de temperaturas associados ao choque térmico), escórias corrosivas, grandes tempos de residência e agitação do banho metálico.

Panelas que não possui aço no interior passa por desgastes por descarbonetação do tijolo (quando estiver no aquecedor e atmosfera oxidante), acúmulo de escórias no fundo da panela (logo após o lingotamento contínuo), hidratação e perda do coating (fase C_2S) do revestimento, caso o refratário for submetido a temperaturas inferiores a $650^{\circ}C$.

Assim, a indústria de materiais refratários tem sido instigada a acompanhar constantemente ao avanço tecnológico da siderurgia. Como o custo com revestimento refratário é uma fatia considerável do montante do custo operacional em uma aciaria elétrica, o qual representa aproximadamente 5% do custo total, é fundamental que estes revestimentos refratários não sofram desgastes prematuros, de tal forma, que adiem ao máximo a saída destes equipamentos do ciclo operacional. Logo, os esforços para combater o desgaste dos materiais refratários são divididos em duas frentes:

- a) Endógenos: são fatores internos que causam o desgaste do refratário, uma fonte de controle é a própria qualidade da doloma (depende diretamente da mina e extração) bem como os controles de processamento do tijolo (atualmente estes dados fazem parte *do know-how* de fabricantes). Estes fatores estão ligados ao campo de atuação dos fornecedores.
- b) Exógenos: controle de estoque, umidade, ciclo térmicos e escórias envolvidas no processo. Estes tipos de desgaste é uma consequência direta das práticas e disciplinas operacionais e está muito mais de posse do setor siderúrgico (clientes).

Logo, do ponto de vista da alta performance do revestimento refratário dolomítico de panela deve-se controlar ou minimizar o efeito algumas variáveis de processo, tais como:

- a) Grande gradiente térmico durante o vazamento e lingotamento: mesmo que as temperaturas de processamento da corrida no FEA sejam normalmente menores se comparado ao FP, a temperatura do revestimento deve estar o mais próximo possível da temperatura do banho metálico. A panela deve ser tapada

enquanto estiver no lingotamento contínuo para evitar a forte perda de calor do aço e, por consequência, evitando que as linhas mais próximas da borda da panela sejam submetidas ao choque térmico;

- b) Escórias corrosivas: escórias contendo potencial de oxigênio baixo, geralmente oriundo do FEA, contém um alto poder de dissolução do material refratário devido sua incompatibilidade química (fluidez e basicidade). Portanto, a passagem de escórias do FEA para a panela deve ser minimizada. A viscosidade da escória permite que o ataque ao refratário seja minimizado quimicamente e termicamente, desde que esteja em condições favoráveis e que não interfiram no processamento do aço.
- c) Grandes tempos de residência: quanto maior for o tempo que o aço permanece dentro da panela, maior será o ataque contra o revestimento, principalmente se o banho ainda estiver em processo lento de desoxidação, pois desta forma, além do banho estar oxidado, expõe o revestimento a esta condição por um tempo elevado. Assim, quanto menor for o tempo da panela no forno, menor será as solicitações sob as quais o revestimento será submetido. Um dos fatores que agravam a degradação do revestimento, no caso de alto tempo de permanência da panela no FP, é o aumento da temperatura média dos refratários devido o sobreaquecimento da escória, resultando em um aumento de penetração da escória no revestimento;
- d) Limpeza do banho pelo grau de agitação: o grau de agitação do banho também têm uma forte influência ao desgaste mecânico do revestimento refratário da panela de aço.

A dessulfuração e o controle de inclusões, segundo Orehoski e Rellermeyer, 1986, também foram levadas para o refino secundário, aumentando o tempo de residência do aço na panela, ainda no FP. Desenvolveram-se técnicas de controle de temperatura e composição química em faixas muito estreitas, além de proporcionar um encharcamento térmico dos revestimentos das panelas, reduzindo a perda de temperatura no lingotamento contínuo, obtendo-se aços mais limpos e com custos competitivos.

Segundo Casséte (2000), face quente do tijolo é assim denominada por estar em contato direto com escória e o aço líquido. À medida que se afasta da face quente para o interior do revestimento, existe uma queda de temperatura, sendo denominada gradiente de temperatura ou simplesmente gradiente térmico. Logo, define-se como gradiente térmico o perfil de temperatura desde a face quente do tijolo até sua face fria (extremidade oposta da face quente do tijolo de trabalho).

Casséte (2000) ainda afirma quais os fenômenos relacionados com o gradiente térmico do tijolo é inerente a produção do aço, porém pode-se minimizar o impacto destes sobre a vida do revestimento refratário, tais como:

- a) O sobreaquecimento do refratário na linha de escórias no FP, aceleram o processo de desgaste do refratário, por dois motivos: primeiro se de alguma forma o arco elétrico atingir o refratário e a outra é aumentar a temperatura da escória que, desta forma, aumenta a sua fluidez, propiciando um maior ataque da escória ao refratário. O nível do banho metálico ou quantidade de escória interfere também no sobreaquecimento da escória e na ação do arco voltaico sobre o revestimento;
- b) Variações bruscas na temperatura implicarão em gradientes térmicos não uniformes, o que contribuirá na geração de fortes tensões térmicas caracterizando o fenômeno de choque térmico. Por isso, as placas que estão fora de ciclo ou destampadas no LC, são muito prejudicadas;
- c) A permanência excessiva de um revestimento nos aquecedores provoca descarbonetação do tijolo. O tijolo sem a presença do carbono diminui sua resistência ao choque térmico e potencializa a corrosão dada pela escória devido ao aumento da molhabilidade desta sobre o revestimento.
- d) O fenômeno de trincamento e lascamento está sempre associado a um gradiente térmico ao longo do revestimento. Assim, se os produtos refratários são desenvolvidos a ter uma resistência máxima a uma dada variação de temperatura (gradiente térmico). Logo, as trincas se desenvolverão nos pontos em que o tijolo for submetido a variações de temperatura superiores a este valor de projeto.
- e) Revestimentos de menores espessuras apresentaram menores taxas de desgaste que os revestimentos mais espessos, pois o gradiente térmico é menor.

A fratura de um tijolo é controlada pela nucleação de uma trinca e sua propagação ao longo do tijolo. Os estudos de Hasselman desencadeou na equação 1, definida para um sólido que seja uniformemente resfriado. A maximização da γ_{wof} é da grandes (grãos grosseiros), (Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono, (QUINTELA, 2001.)). Já o módulo de elasticidade tem relação direta com a microestrutura do material, bem como o coeficiente linear de dilatação.

$$R_{st} = \left(\frac{\gamma_{wof}}{\alpha^2 E} \right)^{1/2}$$

(equação 1)

Onde:

R_{st} = parâmetro de estabilidade de uma trinca, expressando a resistência ao choque térmico do material;

γ_{wof} = energia total da fratura;

α = coeficiente linear de dilatação térmica;

E = módulo de elasticidade do material.

A resistência ao choque térmico de um refratário dolomítico é favorecido por:

- a) Alta condutividade térmica ou baixa expansão térmica (coeficiente linear);
- b) Microestrutura (distribuição uniforme - desde agregados grandes aos pequenos para maximizar o empacotamento da microestrutura - homogênea e agregados arredondados);
- c) Distribuição e tamanho de poros otimizados.

Como é conhecida, a presença de carbono (amorfo ou ainda como sua forma alotrópica grafite), aumenta a condutividade térmica do tijolo, devido à condutividade muito superior deste elemento, em relação aos óxidos constituintes dos refratários, tais como CaO e MgO, no caso do tijolo dolomítico. Sua presença também diminui a diferença entre o coeficiente de dilatação linear das fases, como pode ser evidenciado pela figura 10.

Normalmente este gradiente de calor ao longo do tijolo, entre a face quente (face do tijolo em contato direto com escória/aço) e face fria (contato do tijolo com o tijolo permanente) introduz trações trativas no seio do tijolo provocando trincas que podem delimitar a vida da panela (SEGADÃES, 1997).

Quando o revestimento fica muito tempo nos aquecedores, imerso em uma atmosfera oxidante, ocorre o fenômeno da descarbonetação. O tijolo sem a presença do carbono, quando submetido a grandes gradientes de temperatura (diferença entre a temperatura do tijolo e temperatura do banho metálico), perde-se grande massa do revestimento, conhecido no setor siderúrgico como *Spalling*, ver figura 11.

Tanto o aquecimento como resfriamento brusco deve ser evitado para que se maximize a vida útil do revestimento. Sendo assim, devem-se obedecer as curvas de aquecimento e aperfeiçoar o processo a fim de se obter o máximo de tempo da panela em ciclo. Segundo Segadães (1997) o aquecimento brusco não é tão prejudicial quanto o resfriamento brusco para um tijolo dolomítico como pode ser observado pela figura 12.

Segundo Casséte (2000) para um bom desempenho do revestimento refratário dolomítico de trabalho algumas práticas básicas devem ser adotadas, ou pelo menos que se aproximem ao máximo delas, tais como:

- a) o aquecimento do revestimento deve ser realizado por um período mínimo de 12h, sendo que deve-se respeitar os patamares de encharque dos tijolos, ou seja, o aumento da temperatura de aquecimento deve ter taxa de aumento da temperatura constante de 100°C/h durante as 10 primeiras horas e na sequência manter os 1000°C durante as próximas 2h;
- b) otimizar o número de painéis em ciclo de tal forma a garantir a performance operacional e ao mesmo tempo, garantir que a panela se mantenha sempre aquecida (temperatura do revestimento quanto mais próximo às temperaturas de trabalho melhor);
- c) controlar a viscosidade da escória do forno panela e a formação da fase C₂S (*coating*).

O fenômeno chamado de dano por choque térmico ou termoclase ocorre quando a tensão térmica gerada em um ciclo térmico for suficientemente elevada para gerar a propagação de um dano ao material refratário. Sendo assim, pode-se dizer que a tensão térmica é superior a tensão de fratura.

Ferreira (2010) indica que:

Se a propagação de uma trinca for estável, o resultado é um corpo com trincas mais longas e a resistência vai sendo reduzida progressivamente, à medida que a severidade do choque térmico aumenta. Se a propagação da trinca é inicialmente instável, mas para quando a tensão é aliviada, o corpo terá sofrido uma mudança descontínua da resistência mecânica.

Para Norton⁴ (1949), trincas ou lascamentos nos materiais refratários são originados por:

- a) gradiente térmico no tijolo refratário, devido a aquecimentos e resfriamentos, suficientemente capazes de gerar tensões que excedam a resistência do material;
- b) compressão na estrutura do refratário, devido à expansão pelo aumento da temperatura;
- c) variação no coeficiente de expansão térmica entre superfície e núcleo do tijolo, devido à penetração de escória ou mudança na estrutura do refratário.

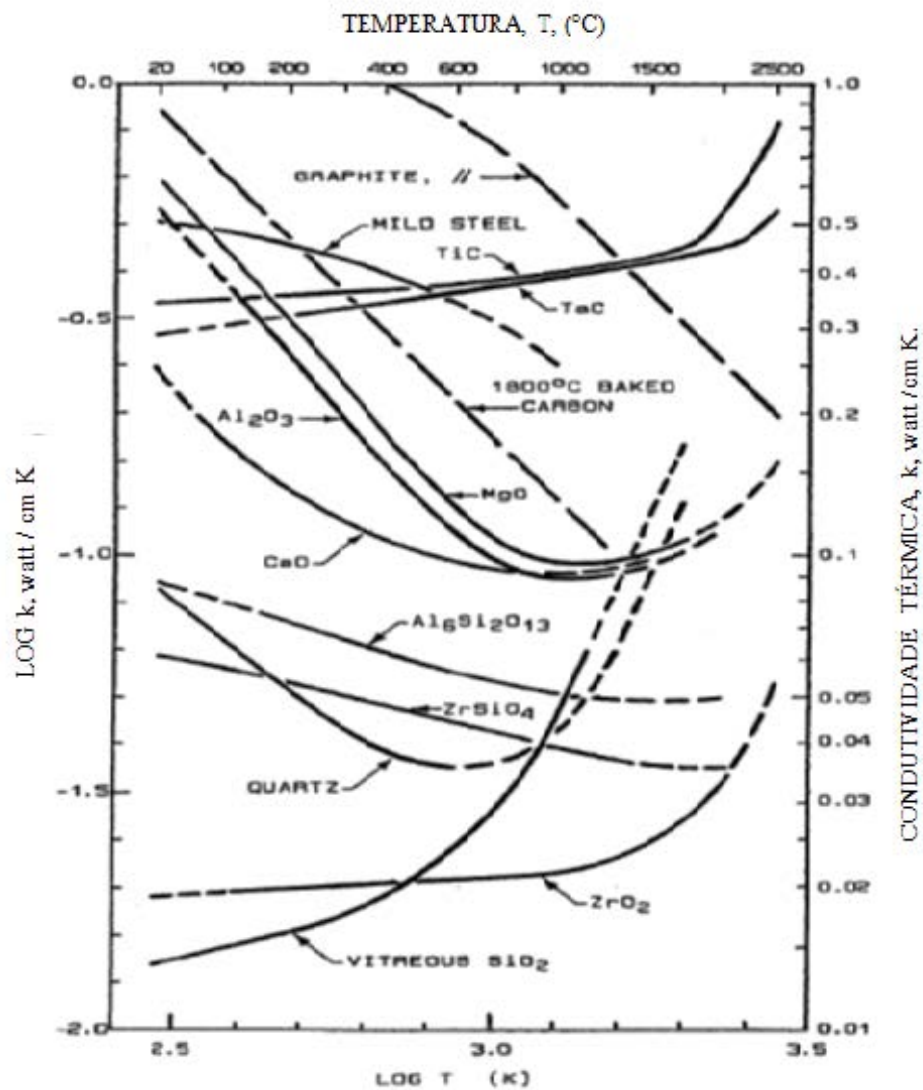
De acordo com Schacht (2004) trincas por choque térmico são atribuídas a ciclos rápidos de aquecimento e resfriamento, desenvolvendo um estado térmico de tensões

⁴ NORTON, F.H. Refractories. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1949.

nos refratários, causando fraturas localizadas e progressivas deteriorações no revestimento. Fraturas por tensões térmicas são umas das principais causas dos mecanismos de desgaste nos revestimentos refratários no processo industrial.

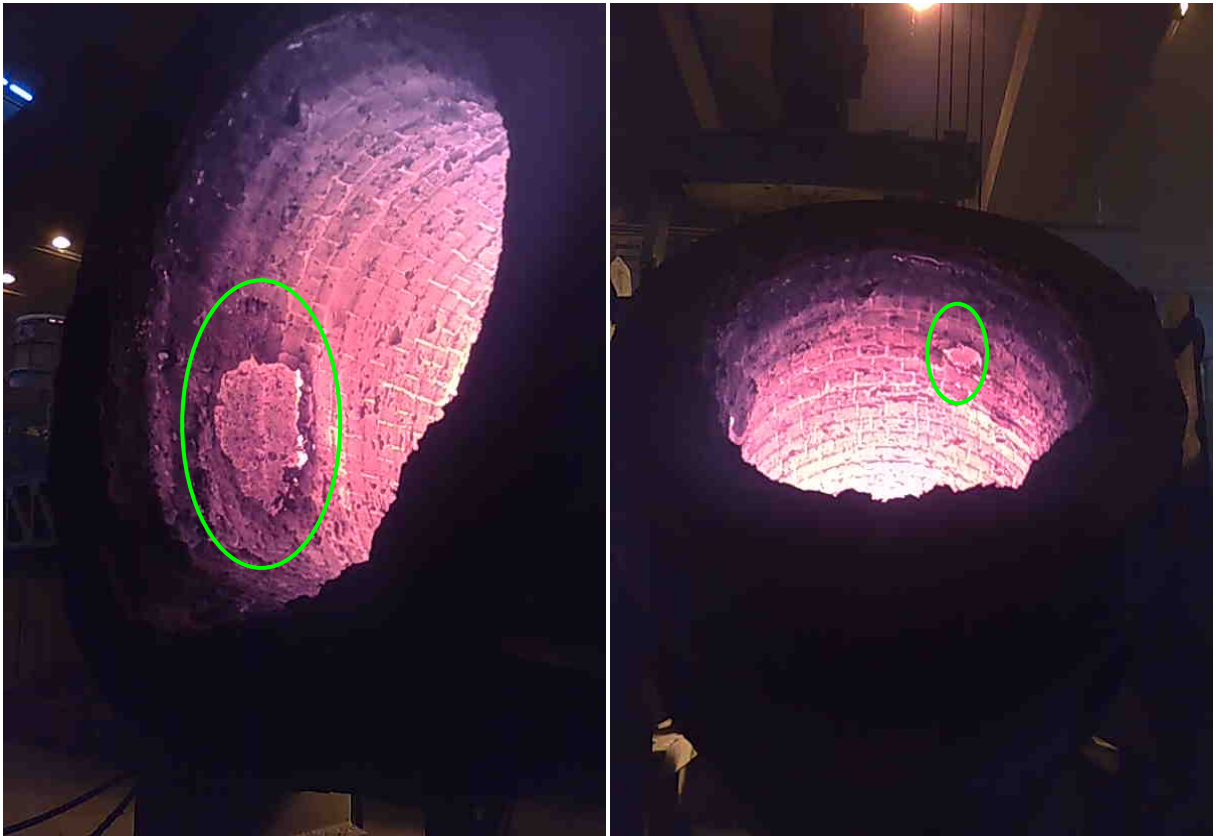
Um gradiente de temperatura não linear durante aquecimento e resfriamento gera um estado de tensões térmicas levando a fratura do revestimento e como consequência a sua deterioração.

Figura 10 – Condutividade térmica dos óxidos pela temperatura.



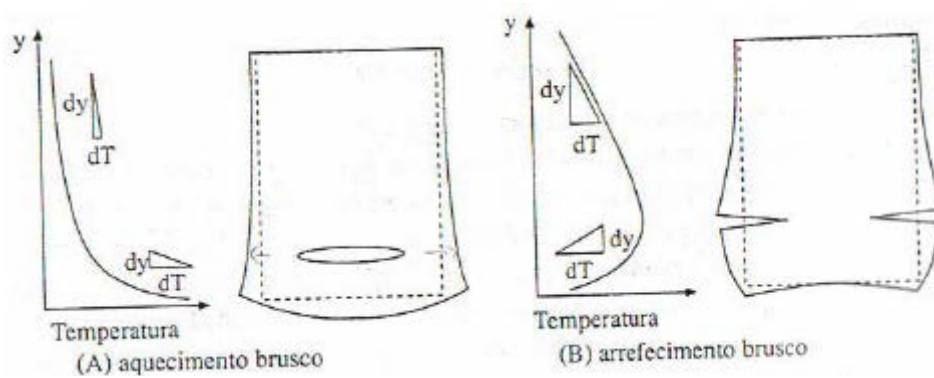
(fonte: CARNIGLIA et al, 1992).

Figura 11 – Lascamento do revestimento (*Spalling*)



(fonte:cortesia MAGNESITA S.A.)

Figura 12 – Efeitos de aquecimentos e resfriamentos bruscos em materiais refratários



(fonte: SEGADÃES 1997)

3.5 DESGASTE TERMOQUÍMICOS DOS REVESTIMENTOS REFRACTÁRIOS

Durante o processamento no forno panela o aquecimento do aço líquido se dá pelo *input* de energia através do arco elétrico. Para que este arco elétrico não agrida o revestimento refratário, a escória deve ter um volume ideal, definida pela equação 2, para que toda a energia seja passada para o banho metálico ao invés de sobreaquecer a zona de escória do revestimento, evitando assim, pontos quentes nestas regiões.

$$\text{Peso de escória} = [(\pi r^2 + 2rL) * D] * \rho^{\text{escória}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

π = valor constante e igual 3,14;

r = diâmetro interno do revestimento;

L = comprimento ao lado reto da carcaça metálica (zero para painéis cilíndricos);

D = altura de escória em função do comprimento do arco elétrico;

$\rho^{\text{escória}}$ = densidade da escória.

O ciclo térmico das painéis em uma aciaria elétrica é de fundamental importância para se elevar a vida em painéis, reduzindo o consumo de refratário e de energia. Em relação ao refratário, o ciclo térmico pode promover mudanças nas dimensões do material refratário após aquecimentos e resfriamentos não bruscos por mais de um ciclo sem que qualquer tensão externa tenha sido aplicada. Materiais refratários de diferentes naturezas possuem dilatações térmicas diferentes. Os regimes ciclos de aquecimento-resfriamento concorrem entre si para que essas diferenças se manifestem de forma deletéria.

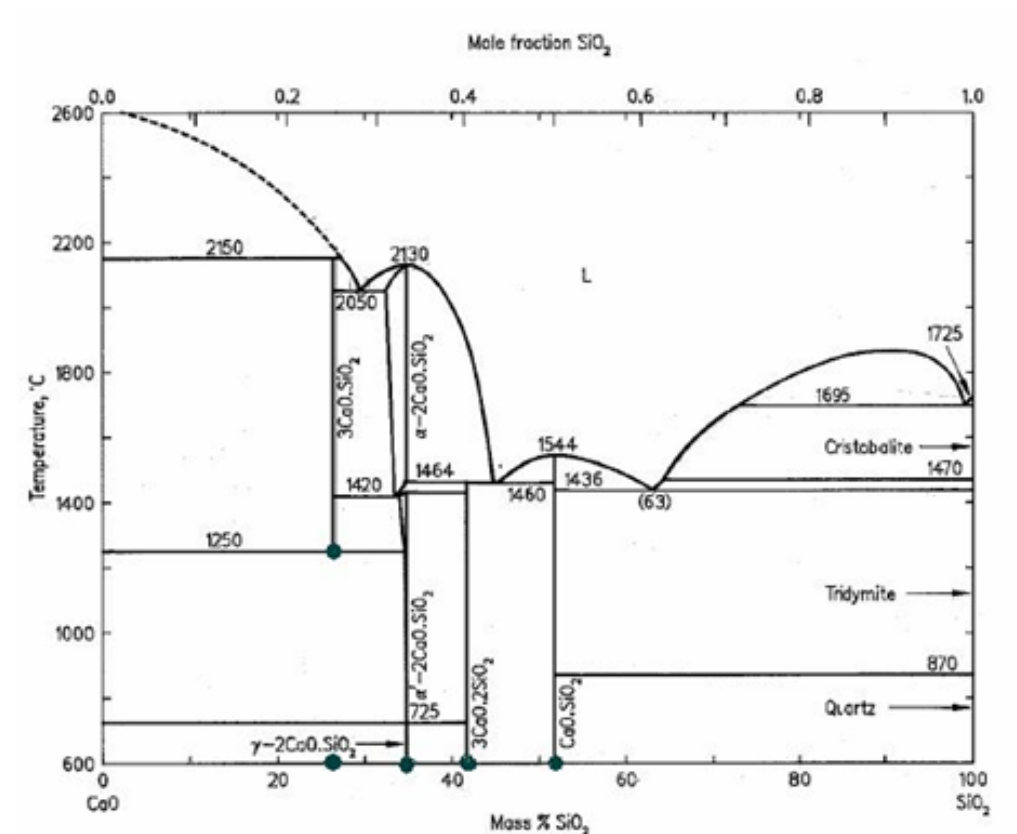
Além disso, destaca-se que a grande vantagem do tijolo dolomítico quando se comparado a outro refratário é devido a presença de CaO livre, a qual reage com a SiO₂ da escória formando o silicato di-cálcio (2.CaO.SiO₂, referido como C₂S), conhecido como *coating* (camada protetora) do revestimento de trabalho, aumentando a resistência à penetração de escória líquida.

Desta forma, todos os fatores que favorecem a formação do *coating*, bem como sua permanência ao longo da vida da panela, são de suma importância para o bom desempenho do

Os óxidos fluidizantes podem estar combinados presente na fase líquida, como também na fase sólida da escória, formando fases de reologia cujas quais têm pontos elevados de fusão, como por exemplo, o di-silicato de cálcio ou C_2S ($2.CaO.SiO_2$) e o magnésia-wüstita ($MgO.FeO$). Assim sendo, um dos indicadores essenciais para a operação é o índice de basicidade binária, B2.

O entendimento das aciarias é trabalhar com esta relação (B2) superior a 1,5 nas escórias de forno panela, pois a curva líquidos nesta região possui temperaturas elevadas, mesmo que sejam constituídas de fases líquidas e sólidas, apresentar maior viscosidade, as mesmas têm grande compatibilidade com o revestimento refratário dolomítico, uma vez que a escória possui elevados teores de CaO. Outra constatação de fácil visualização é que a escoria que possui B2 igual ou superior a 1,5 acima de $1464^\circ C$, apresenta em sua composição a fase $\alpha C_2S + L$, sendo que αC_2S é de caráter básico. Já para basicidades B2 na faixa de 0,54 a 1,22 possuem temperatura de líquidos na faixa de $1436^\circ C$ e $1500^\circ C$ e, portanto, são líquidas e extremamente agressivas aos revestimentos à base de MgO, conforme pode ser evidenciado pelo diagrama binário CaO-SiO₂ (figura 14).

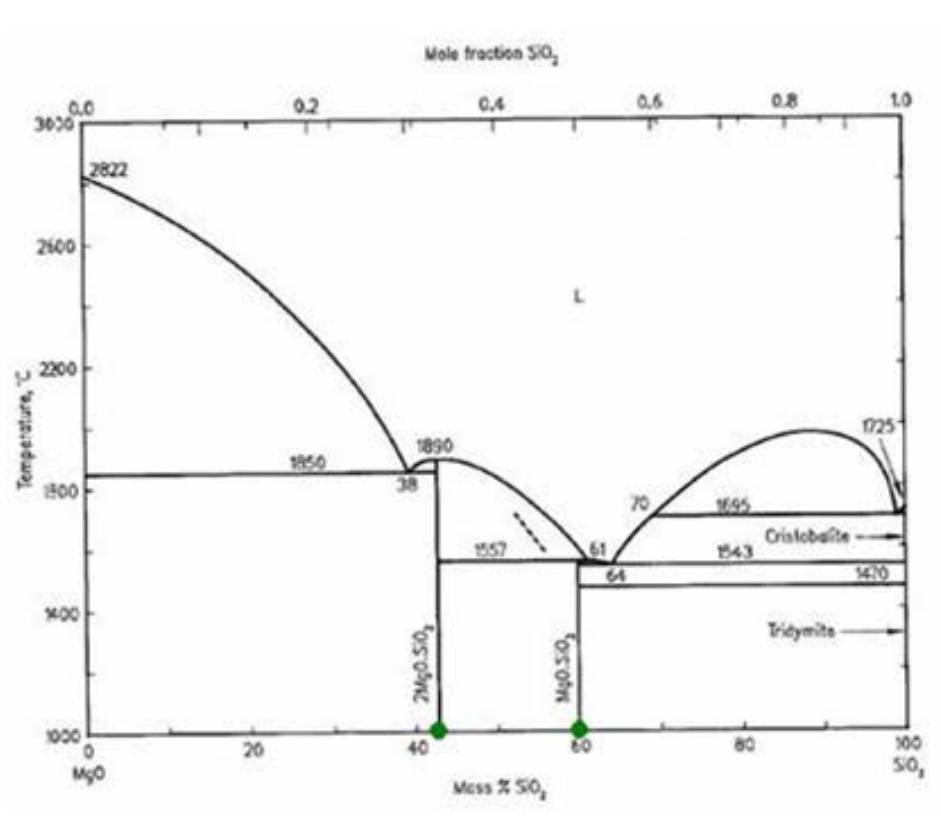
Figura 14 – Diagrama Binário CaO – SiO₂



(fonte: SLAG ATLAS, 1995)

Segundo Gonçalves (2000) as aciarias elétricas devem saturar suas escórias de forno panela em MgO, de modo que este óxido não seja oriundo do tijolo refratário. Geralmente, uma panela que seja acalmada ao alumínio, as quais utilizam revestimentos MgO-C, em temperaturas de trabalho de 1650°C, se o refratário for atacado pela SiO₂ presente na escória, poderá haver uma formação de um produto de ponto de fusão de 1580°C (caso de 60% de SiO₂ e 40% MgO). Para que não haja a degradação do refratário, uma pequena adição de MgO faz com que o limite de solubilidade desse óxido seja excedido, dando origem a uma fração líquida e uma fração sólida (2MgO.SiO₂), interrompendo o desgaste do refratário, como pode ser evidenciado pela figura 15.

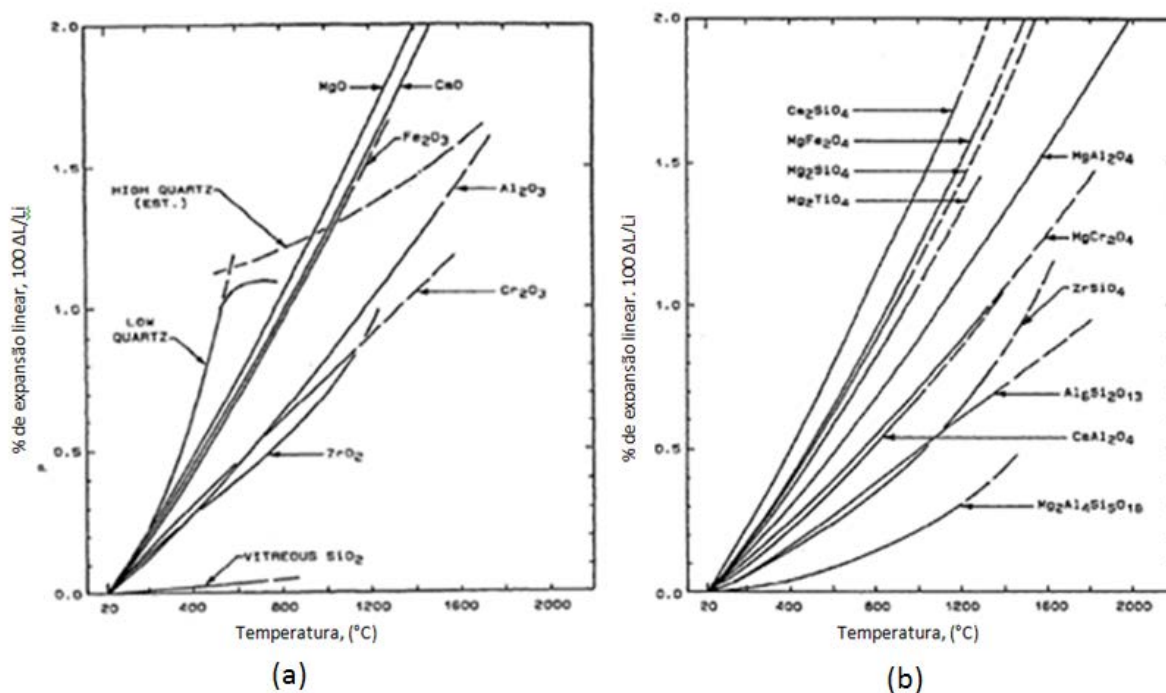
Figura 15 – Diagrama Binário MgO-SiO₂



(fonte: SLAG ATLAS, 1995)

Na figura 16 observa-se que acima de 1000°C a expansão térmica do C₂S é superior a dos constituintes do tijolo dolomítico, de modo que a variação de temperatura pode prejudicar a permanência do *coating* (C₂S). Assim, pequenas variações da temperatura de trabalho são mais nocivas à fase C₂S do que as fases CaO e MgO (presentes no tijolo), devido ao seu maior coeficiente de dilatação linear.

Figura 16 – Coeficiente de dilatação térmico pelo aumento da temperatura: (a) MgO e CaO e (b) Fase C₂S (Ca₂SiO₄)



(fonte: CARNIGLIA et al, 1992)

Segundo Russell (1997) a formação da fase C₂S (T_f = 2130°C) na interface refratário escória, retarda a dissolução da fase CaO pela ação da escória líquida (óxidos fluidizantes: FeO + MnO), uma vez que esta fase, C₂S, é uma “capa” que protege o refratário contra a penetração desta escória. Kishidaka (1980) afirmou que escórias do tipo líquidas atacam os refratários dolomíticos preferencialmente em sítios de maior energia livre (frestas e trincas presentes nos tijolos dolomíticos). Toritani⁵ et al (1984 apud LEE,1999) investigaram o ataque químico em refratários doloma e MgO-CaO-C sinterizados. Em seus estudos, constataram que o desgaste dos refratários é reduzido com o aumento da concentração de CaO na escória, frente a escórias com baixo teor de ferro e baixa razão CaO/SiO₂.

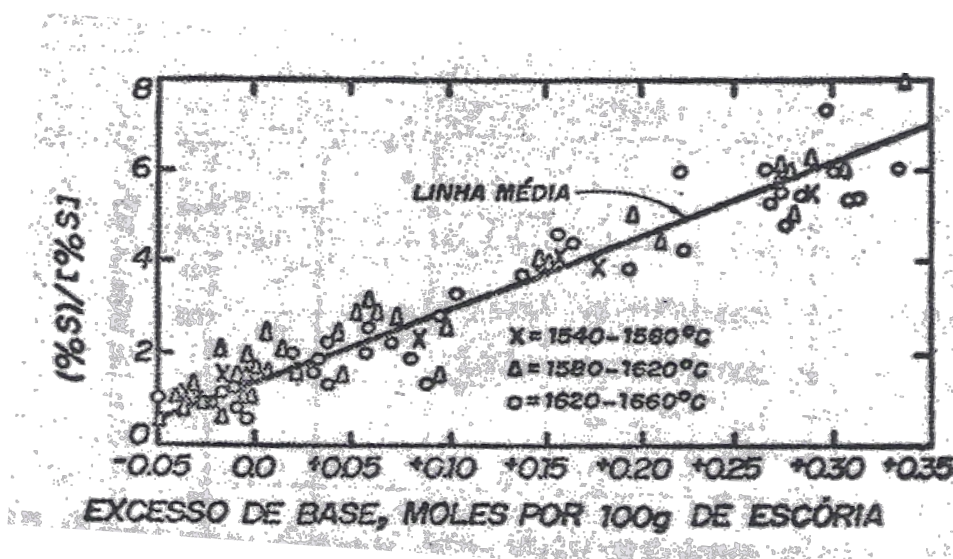
A dessulfuração, a qual é realizada no refino secundário, ocorre pela reação na interface banho/escória, sendo favorecida pelo aumento da CaO na escória, conforme pode ser observado na equação 3 (equação termodinâmica da dessulfuração para a metalurgia de panela) e figura 15, ambas retiradas do estudo feito por Turkdogan (1996):

⁵ TORITANI, H.; KAWAKAMI, T.; TAKAHASHI, H.; TSUCHIYA, I. *Taikabutsu*. n. 36, 1984, p. 91-92.

$$\ln \%S = \frac{(\Delta G_S^0 - \Delta G_O^0)}{RT} + \ln a_{MS} - \ln a_{MO} + \frac{\mu_{O_2}}{2RT} - \ln f_S \quad (\text{equação 3})$$

O problema é que com o aumento dos óxidos básicos na escória (CaO) a mesma fica “dura”, dificultando que ocorra o fenômeno da dessulfuração. Assim, o uso de fluidizantes em escórias, durante o refino secundário, são largamente utilizados nas aciarias, onde a mais comum é a fluorita (CaF₂) que, como pode ser visto na figura 18, baixa o ponto de fusão da CaO. Em resumo, manter a basicidade é vital para que a reação de dessulfuração ocorra, conforme pode se observar na figura 17, porém deve-se adicionar fluidizantes com moderação para que se baixe o ponto de fusão da escória.

Figura 17 – Relação entre basicidade CaO/SiO₂ e coeficiente de bipartição do enxofre.

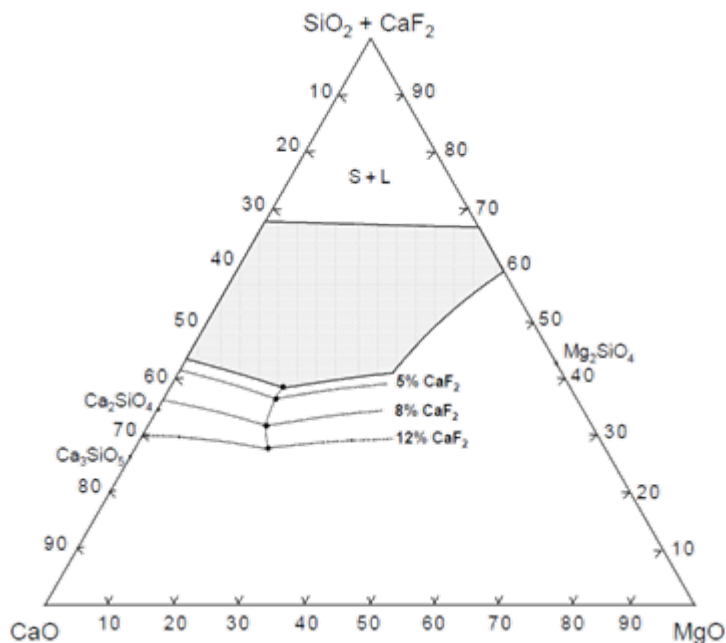


(fonte: TURKDOGAN, 1996)

Contudo, vale lembrar que o aumento da temperatura aliada à fluidez da escória (adição da fluorita) atacam fortemente o refratário dolomítico e, como estas duas combinações são intrínsecas do processo de metalurgia de panela, ambas devem ser amplamente controladas e minimizadas sem prejudicar o processo. A figura 18 mostra o deslocamento da linha liquidus à medida que se aumenta o teor de Ca₂F presente na escória, favorecendo a formação de escória de baixa viscosidade, o que acarreta em maior ataque ao refratário dolomítico. As adições de fluorita devem ser balanceadas de acordo com a escória presente no FP. Segundo

Pretórios (2002), deve-se atingir a região preferencial da fase C₂S, e toda a adição de CaF₂ deve ser otimizada para este fim, sem interferir na qualidade do aço.

Figura 18 – Efeito da adição de CaF₂ no diagrama de fase ternário a 1600°C



(fonte: PRETÓRIOS, 2002b, p. 34)

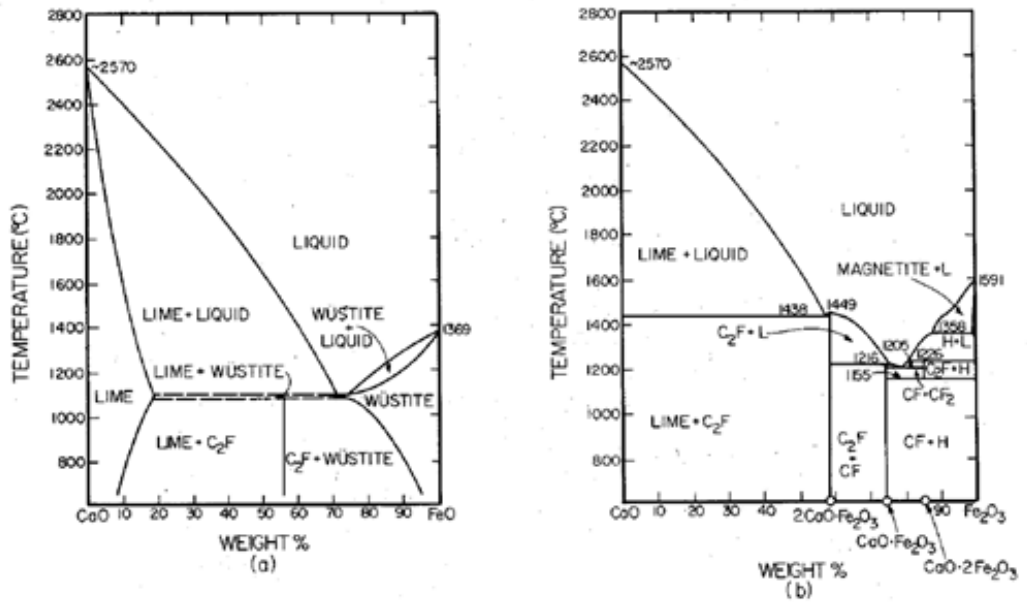
Chiang (1988) também reforça que a presença de óxidos FeO e Fe₂O₃, predominantemente presentes na escória do forno panela, acaba furando a barreira C₂S na interface escória refratário, ajudando na dissociação da cal, através da redução do ponto de fusão do CaO, como podemos observar pelos diagramas da figura 19. Nestes diagramas se observa o tamanho do efeito nocivo à temperatura de fusão da CaO, devido a formação de fases de baixo ponto de fusão. A medida que cresce a participação dos óxidos de ferro (wustita ou hematita, diagrama (a) e (b) da figura 19, respectivamente), diminui-se significativamente a temperatura de fusão destas novas fases (até aproximadamente 70% da presença do óxido de ferro, em ambos diagramas da figura 19), acelerando a degradação do refratário por estar sendo submetido a escórias líquidas.

Williams⁶ (1982 apud LEE, 1999) relatou que a MgO do tijolo dolomítico reage com o ferro-silicato, presente na escória do forno panela, formando uma fase denominada de magnesiowustita, [(Fe, Mg) O], solução sólida que precipita na camada limite C₂S a 1300°C.

⁶ WILLIAMS, P.; SUNDERLAND, M.; BRIGGS, G. Interactions between dolomitic lime and iron silicate melts. *Ironmaking & Steelmaking*. n. 9, p. 150-162. 1982.

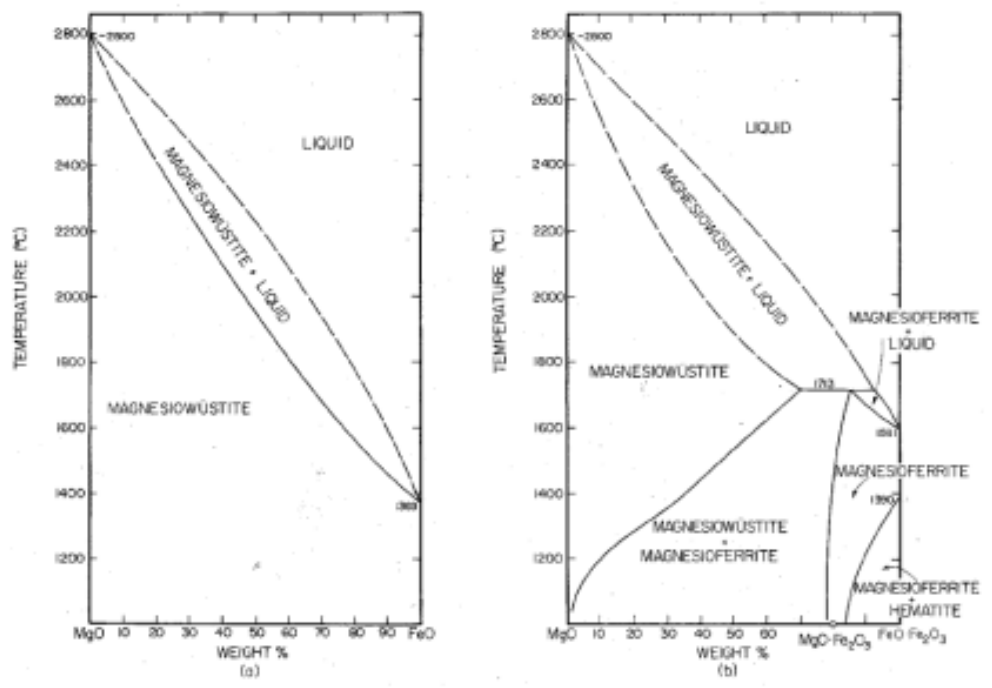
Esta fase é produto de baixo ponto de fusão, a qual diminui a vida do revestimento, como podemos observar na figura 20.

Figura 19 – Diagramas de fase: (a) CaO-FeO, (b) CaO-Fe₂O₃



(fonte: PRETORIUS, 2002, p. 19)

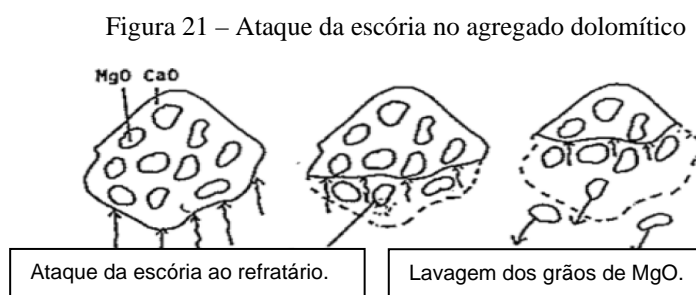
Figura 20 – Diagramas de fase: (a) MgO-FeO, (b) MgO-FeO-Fe₂O₃



(fonte: SEGADÃES, 1997)

Como pode ser observado pela figura 20 existe uma redução significativa do ponto de fusão do MgO, em virtude da formação das novas fases criadas pelo aumento da participação dos óxidos de ferro.

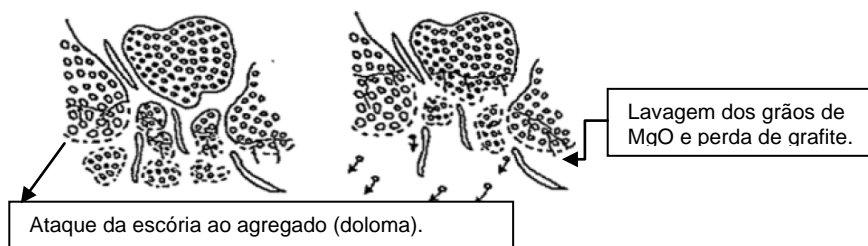
Matsushima (1977) mostrou em seus estudos que a corrosão do agregado ocorre através da formação de compostos de baixo ponto de fusão junto ao CaO, promovendo a retirada dos grãos de MgO, pelo fenômeno denominado de “lavagem” como pode-se ver na figura 21.



(fonte: adaptação, JANSSON et al., 2008, p.100)

A figura 22 mostra de forma simplificada o ataque que o refratário dolomítico sofre, perdendo-se quantidades significativas da parte mais nobre deste refratário, grãos de Periclásio MgO, assim como grãos de grafita, que, como visto anteriormente, é vital para a relaxação da estrutura (aumento da resistência ao choque térmico).

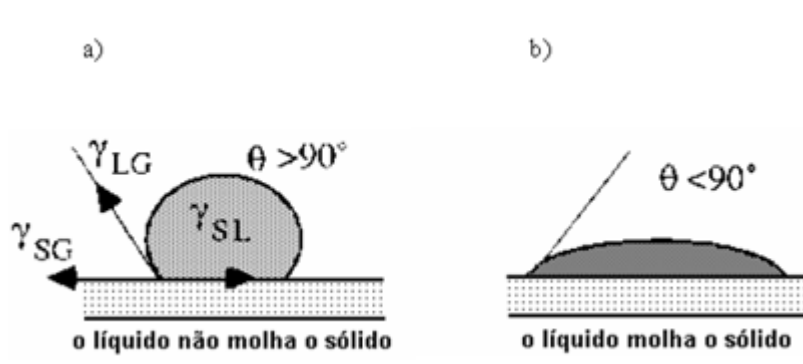
Figura 22 – Degradação do refratário dolomítico pelo ataque da escória



(fonte: adaptação, JANSSON et al., 2008, p.100)

A quantidade de carbono presente no tijolo é uma das variáveis mais importantes no que se refere garantir baixa molhabilidade do tijolo pela escória, pois o carbono possui elevada tensão superficial e assim, sua adição ao tijolo regula a tensão superficial entre a escória e a face do refratário, impedindo que o tijolo seja infiltrado por escória líquida ou aço líquido, como pode observar pela equação 4 e figura 23 (SEGADÃES, 1997):

Figura 23 – Molhabilidade de um Substrato. (a) Não molha. (b) Molha



(fonte: SEGADÃES, 1997)

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SG} + \gamma_{LG} \cdot \cos \theta = 0 \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

γ_{SL} : tensão superficial sólido - líquido

γ_{SG} : tensão superficial sólido - gás

γ_{LG} : tensão superficial líquido - gás

θ : ângulo de contato

Observa-se que o fenômeno de degradação por corrosão está associado à molhabilidade do refratário pela escória, fortalecendo a teoria que o carbono, assim como outros materiais covalentes, tem papel fundamental na resistência à corrosão, uma vez que o mesmo sela os poros da superfície impedindo a penetração no tijolo (SEGADÃES, 1997).

Ferreira (2010) indica que:

Segundo Lee e Zhang⁷ (2004) a corrosão localizada pode ocorrer em determinadas fases do sólido. Um exemplo é a descarbonetação do refratário, pela dissolução do carbono no aço. Uma vez removido este elemento do refratário, o mesmo será molhado pela escória, permitindo a penetração nessa região.

⁷ LEE, W.E, ZHANG, S. Direct and indirect slag corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. **VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy**, 2004. p. 309-320.

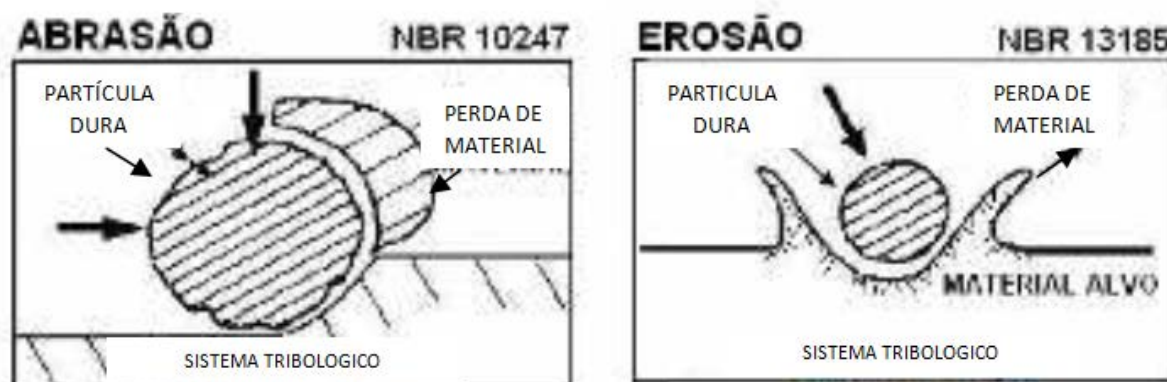
3.6 DESGASTES POR ABRASÃO OU EROSÃO DOS REFRAATÓRIOS

A incidência de fumos ou gases em altas velocidades (no caso dos aquecedores), abrasão de sólidos metálicos ou não-metálicos (durante o vazamento do FEA para a panela), impacto mecânico de equipamentos de limpeza de panelas, todos estes, são fontes de degradação do refratário em serviço por abrasão.

Na abrasão, considera-se o principal fator de desgaste o atrito, enquanto que para erosão (impingimento de partículas), tem-se o impacto, além de um mecanismo mais complexo que pode envolver microtrincamento, fratura dúctil/frágil e desprendimento de grãos (figura 24). A abrasão/erosão depende principalmente das características microestruturais (tipo, proporção, forma, tamanho, orientação e distribuição de fases – incluindo a porosidade).

Os materiais que apresentam maior resistência à erosão são normalmente aqueles cujos grãos ou agregados grandes, arredondados e a matriz quimicamente ligada. Normalmente, quanto maior a resistência mecânica de um tijolo, maior a sua resistência à erosão.

Figura 24 – Tipos de desgaste mecânico



(fonte: GERDAU, 2008, 215)

3.7 DESGASTES TERMOMECÂNICOS DOS REFRAATÓRIOS

O desgaste termomecânico dos refratários em siderurgia se dá por fluência, uma vez que o mesmo acaba se deformando, quando submetido ao carregamento, em temperaturas bem abaixo das temperaturas de fusão destes refratários. A $\frac{3}{4}$ da temperatura de fusão do refratário (conhecida como temperatura de Tammann), os materiais refratários podem sofrer

deformação plástica (esta deformação é conhecida como fluência) cuja amplitude depende do tempo e da carga aplicada.

A esfoliação térmica (*spalling*) é a perda de fragmentos ou lascas da face do tijolo, devido a tensões resultantes de taxas desiguais de expansão ou contração entre as diferentes regiões do revestimento e é usualmente associada com mudanças bruscas de temperatura. Materiais refratários com elevada resistência à esfoliação térmica são aqueles que possuem baixa taxa de expansão térmica, alta resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade.

3.8 MONTAGEM DAS PANEAS

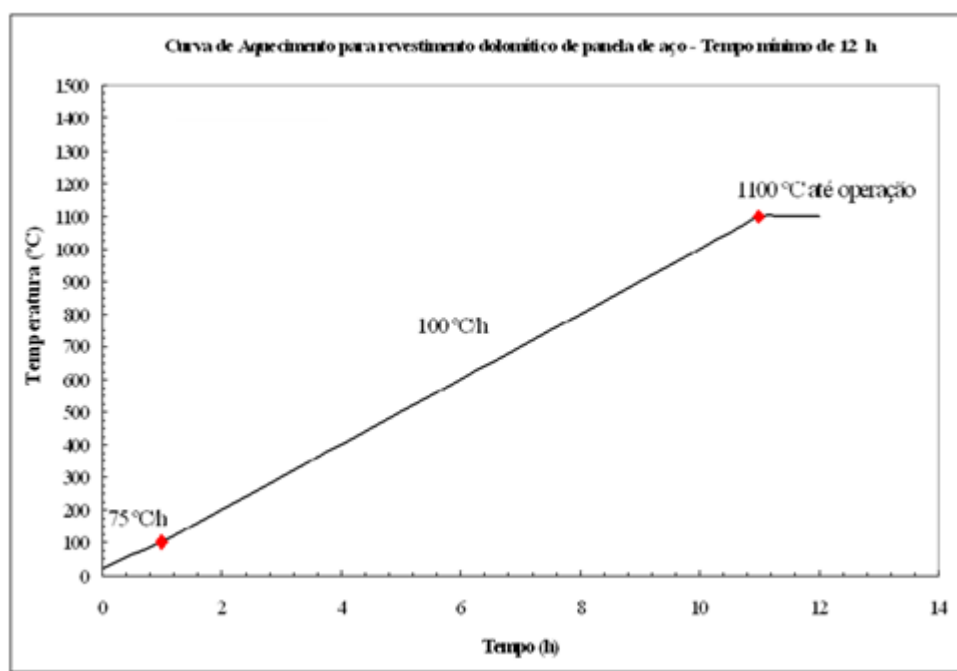
A montagem dos revestimentos de projetos é do tipo cilíndrico e o formato do tijolo é radial (MINI-KEY), para esta aciaria. Primeiramente, depois de totalmente limpa a carcaça metálica, inicia-se a montagem do fundo da panela com o uso de tijolos aluminosos (2 fiadas) e na sequência duas fiadas na parede, finalizando assim a montagem do revestimento de segurança (permanente). Logo depois, inicia-se a concretagem das sedes e depois levada ao aquecedor para curar o revestimento (retirar parcialmente a umidade do revestimento de segurança).

Utiliza-se uma massa básica para nivelamento do fundo da panela para iniciar a montagem do tijolo de em uma superfície plana. Por fim, montam-se as linhas de tijolo de trabalho, obedecendo aos cuidados de juntas e espessura de *back-fill*.

3.9 CICLO DAS PANEAS

As panelas com revestimentos de trabalho novos são submetidos a taxas constantes de aquecimento, obedecendo a curva conforme a figura 25. Sendo assim, as panelas são aquecidas a uma taxa de 75°C/h da temperatura ambiente até a primeira hora de aquecimento e posteriormente a uma taxa de 100°C/h até a décima primeira hora de aquecimento, mantendo a temperatura de 1100°C até a entrada em operação. O aquecimento é realizado com gás natural enriquecido com oxigênio.

Figura 25 – Curva de aquecimento do revestimento refratário dolomítico



(fonte: cortesia MAGNESITA S.A.)

Logo depois deste aquecimento mínimo de 12h no aquecedor vertical, as panelas são colocadas no aquecedor horizontal para a montagem dos refratários periféricos (válvulas, plugs, placas e etc). A panela é então levada para a adição da areia de vedação da válvula e posteriormente enviada para o fosso de vazamento onde irá receber o aço líquido a uma temperatura média de 1650°C. Durante o vazamento é ligado o sistema de rinsagem e adicionados os elementos desoxidantes, os quais têm por objetivo reduzir o potencial de oxigênio no seio do banho. Em seguida é adicionado as ligas e carbureto de cálcio para desoxidação do aço. A retirada do oxigênio do banho tem por finalidade garantir as propriedades mecânicas do aço depois de solidificado, através das adições dos desoxidantes e ligas. Ainda neste momento é adicionado às cales, calsítica e dolomítica, para se beneficiar da agitação gerada pelos desoxidantes, facilitando a sua dissolução, dando origem a escória da metalurgia secundária. Sobre a escória é adicionado fluorita para diminuir a viscosidade durante a dissulfuração no FP.

Após o vazamento a panela é deslocada pela ponte rolante até a estação do forno panela onde será realizada a coleta de amostra do aço para ajuste final da composição química e temperatura do banho para poder liberar a panela dentro dos limites estabelecidos nos padrões

operacionais de lingotabilidade. Ainda nesta etapa retiram-se amostras de escórias no para futuras análises e armazenamento dos dados da corrida.

Atendido todos os padrões operacionais a panela é então enviada ao lingotamento contínuo onde iniciará a transferência do aço líquido da panela ao distribuidor pelo dispositivo chamado de válvula gaveta (regulador de aço líquido entre a panela e o distribuidor). Uma vez o aço esteja no interior do distribuidor o mesmo será direcionando aos moldes, para a solidificação do aço e produção dos tarugos. Durante esta etapa é colocada uma tampa sobre a panela com o objetivo de reter o calor dentro da mesma, evitando perda de energia e choque térmico do revestimento refratário da panela.

Esta tampa é constituída de uma carcaça metálica, revestida de refratário aluminoso. Esgotado o aço, a panela é retirada da máquina e encaminhada para a baía de escória com o intuito de vaziar a escória retida no fundo da panela e limpeza correta da borda, plug e sede de válvula. Esta retirada da escória é essencial que se faça quando ainda a mesma estiver líquida, sob a pena de agarre no fundo da panela, diminuindo o volume útil da mesma e a presença de fases de baixo ponto de fusão próximo às sedes. Em seguida a panela é levada ao trole de aquecimento horizontal onde é realizada uma inspeção dos refratários da válvula gaveta, desgaste das sedes e o restante do revestimento. Neste período a panela permanece no aquecedor a fim de manter o revestimento aquecido ou é enviado diretamente ao FEA para pegar o próximo vazamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

As folhas com apresentação das informações técnicas de ambos os tijolos estão apresentadas na tabela 1. Em quase sua totalidade, este é o máximo de informações que os fornecedores acabam passando para seus clientes, até para se preservarem o know-how desenvolvido por suas empresas.

Tabela 1 – Ficha técnica dos materiais

TIJOLO	ANÁLISE QUÍMICA DO TIJOLO					PROP. FÍSICA DO PRODUTO			
	%CaO	%MgO	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	Dens. Apar. (g/cm ³)	Porosida de Apar. (%)	Res. a Comp. a frio (N/mm ²)	Carbono total (%)
A	58,50	39,5	1,0	0,5	0,5	2,89	6	40	7
B	47,0 / 50,0	42,5 / 45,5	NÃO INFORMADO			2,9 / 3,0	2 a 6	25 / 65	4,5 / 6,5

(fonte: elaborado pelo autor)

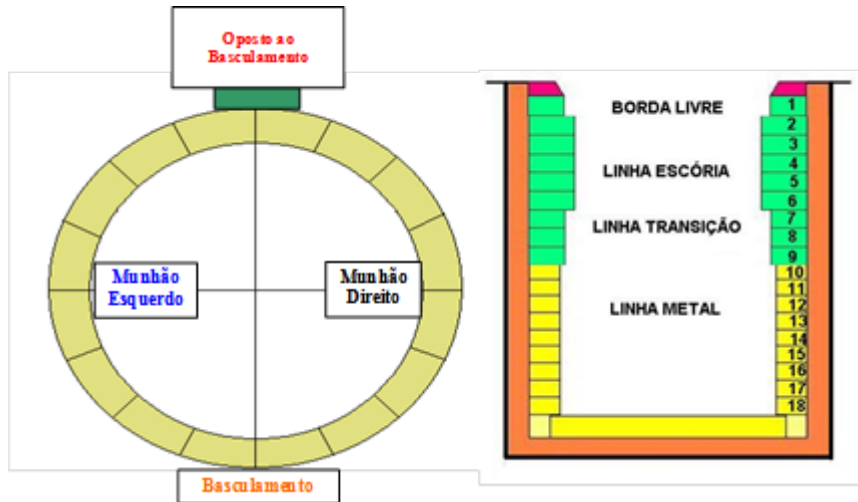
4.2 MÉTODOS

4.2.1 Análise de residual

Depois que a panela chega ao final da vida útil, a mesma é encaminhada para o setor de refratários para manutenção da válvula gaveta e a construção de um novo revestimento refratário. Durante o desmanche do revestimento, foram medidas as espessuras dos residuais com o auxílio de uma trena. A figura 26 mostra as regiões de onde foram medidos os residuais, como as mesmas estão dispostas ao longo do revestimento e como as linhas (fiadas) foram enumeradas durante a montagem de uma panela nova. Em virtude da região do basculamento apresentar maiores residuais historicamente, decidiu-se não medir esta região. A cada fiada desmanchada, mede-se o tijolo de menor residual de cada fiada e região. Nem sempre o desgaste é uniforme na mesma fiada, sendo assim, considera-se a menor espessura.

Todos os resultados são tabulados e calculado a taxa de desgaste por fiada, sendo que é considerado como taxa de desgaste da fiada, aquele tijolo que sofreu maior desgaste

Figura 26 – Desenho esquemático da montagem da panela



(fonte: elaborado pelo autor)

Como se sabe qual é a medida do tijolo novo e com a obtenção do residual do tijolo no final da campanha, pode-se estimar a taxa de desgaste em mm/corrida em cada região pela equação 5.

$$Tx = (Ai - Af) / NC \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

Tx = taxa média de desgaste;

Ai = espessura inicial do tijolo;

Af = espessura final do tijolo (residual);

NC = número de corridas da campanha do revestimento.

Originalmente a linha de metal da panela é compreendida entre a fiadas 09 e 18, com o tijolo entrando em operação com 127 mm (5"). Já entre a fiadas 07 e 08 é considerada linha de transição, com 152 mm (6"), o mesmo tijolo é utilizado na borda livre (fiadas 01 e 02) e, por último, da fiada 03 a 06 é considerada a linha de escória da panela, a qual entra com um comprimento de 178mm (7"), ver figura 26.

4.2.2 Análise no MEV (Microscópio eletrônico de Varredura)

As microestruturas dos tijolos dolomíticos, de ambos os tijolos, foram investigadas pela tecnologia de microscopia eletrônica de varredura. Assim, utilizou-se o equipamento um equipamento da marca Jeol, modelo JSM-5410, equipado com microsonda.

As superfícies de interesse da amostra foram recobertas com grafita por *sputtering*. A amostra foi embutida em resina e polida com acabamento espelhado, especialmente para a obtenção de imagens por elétrons retroespalhados e microanálises por raios X.

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 material, 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 adquirida 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, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que elemento está sendo observado.

4.2.3 Análise DRX (análise de difração por raios-x)

O equipamento utilizado foi Shimadzu XRF-1800[ppm] -Tubo 4kW. A difração de raios X consiste no método de análise não-destrutiva que revela informações sobre a estrutura cristalina dos materiais, através do espalhamento elástico de raios X por estruturas que possuem ordenamento de longo alcance. Através desta análise é possível ver a estrutura cristalina, posição dos átomos na rede, parâmetros de rede, deformação e tensões residuais na rede cristalina e as fases de uma microestrutura. O grande interesse aqui foi avaliar a presença do carbono em sua forma alotrópica grafite.

O equipamento tem um banco de dados ICDD (International Centre for Diffraction Data) para comparar os picos gerados.

4.2.4 Análises térmicas (TGA/DTA)

A análise térmica é o nome dado às técnicas experimentais analíticas, as quais estudam o comportamento químico e físico de uma substância quando submetida a variações de temperatura controlada. Estas técnicas são aplicadas a materiais polímeros, metálicos, orgânicos e inorgânicos. Então, são preparadas amostras ou corpo de provas, com massa de 70g a 80g e à medida que o corpo vai aquecendo é sinalizada a perda de massa de acordo com o range de temperaturas vai avançando. Estes corpos de prova são colocados em um cadinho de alumina com aquecimento de 30 a 1150°C com 10°C/min em atmosfera de ar sintético com fluxo de 10mL/min. O equipamento utilizado foi um METTLER TOLEDO TGA/SDTA851e.

TGA – Análise Termogravimétrica: a variação da massa da amostra é medida enquanto a temperatura aumenta a uma taxa constante. Ex.: estudo da degradação térmica de polímeros ou materiais inorgânicos.

DTA - Método diferencial de temperatura, no qual a temperatura da amostra é comparada a uma amostra inerte de referência. Assim, esta técnica elimina os efeitos da taxa de aquecimento e outros distúrbios externos que podem mudar a temperatura da amostra. Ele também suprime a alta temperatura de ambos os materiais, possibilitando a captação e ampliação de sinais menores.

4.2.5 Montagem e monitoramento

Foram montados 6 revestimentos de cada tijolo, sendo que foram colocadas pareadas na sequência de vazamentos. A panela só passou para o aquecimento depois de uma criteriosa análise a fim de se reduzir ao máximo os erros de montagem. Durante as operações de forno panela foram retiradas amostras de escórias e monitorada a temperatura do banho antes de enviar ao LC. Este planejamento contempla a redução de variáveis que possam interferir nos resultados das análises de residuais.

Durante a montagem dos revestimentos de trabalho, foram separados tijolos novos da linha de escória, de ambos os tipos, embalados com cal, para envio ao laboratório, onde foram feitas as análises: raios-x, MEV, EDS, entre outros.

4.2.6 Taxa de oxidação

No fundo da panela foram colocados dois tijolos (tijolo A e B) da linha de metal durante o aquecimento do vertical, durante 10h, dos 6 revestimentos de cada tijolo. Os tijolos ficaram resfriando-se ao ar por 15h e depois foi medida a taxa de descarbonetação dos tijolos com o auxílio de uma fita métrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES DE RESIDUAIS (*POST MORTEM*)

A seguir, serão apresentados os residuais das campanhas e taxa de desgaste por fiada em cada região, das painéis que foram utilizadas nos testes. A tabela 2, abaixo, mostra de forma resumida, como foi à campanha da painél de cada revestimento (tijolo A e B), assim como a maior taxa de desgaste encontrada na painél (mm/corrida). Ao final da tabela podemos ver em destaque as médias para o nº de corridas e maior taxa média de desgaste em cada tijolo.

Tabela 2 – Taxa de desgaste entre os tijolos

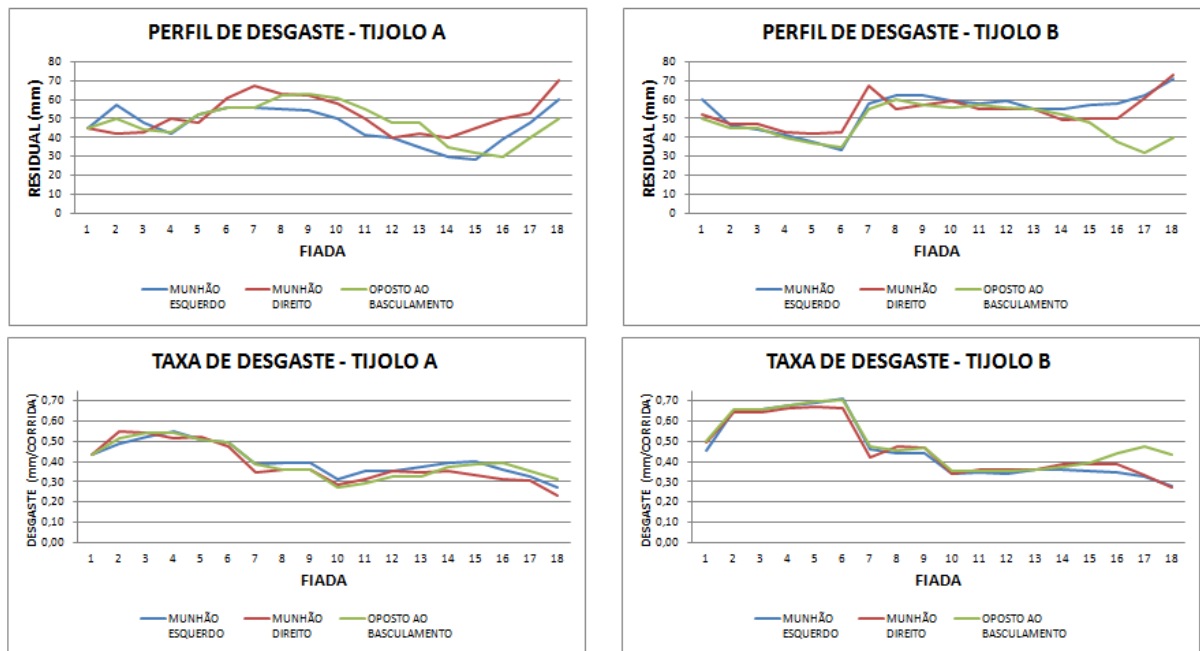
TIJOLO A		TIJOLO B	
Vida da painél (Nº de corridas)	Taxa de desgaste (mm/corrida)	Vida da painél (Nº de corridas)	Taxa de desgaste (mm/corrida)
234	0,54	203	0,65
243	0,51	205	0,61
237	0,52	226	0,63
246	0,52	204	0,67
248	0,53	183	0,73
277	0,52	195	0,70
248	0,52	203	0,67

(fonte: elaborado pelo autor)

Uma melhor forma de visualizar o perfil e taxa de desgaste de cada fiada, foi realizado uma média das seis medições de cada revestimento, conforme pode ser visto nos gráficos da figura 27.

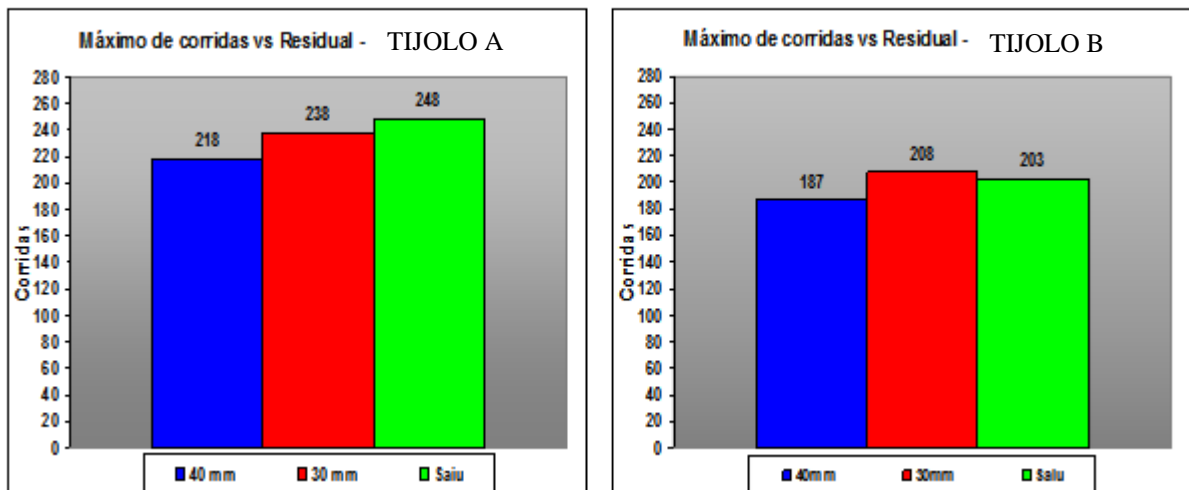
A figura 28 mostra a projeção da média de corridas que a painél sairia de operação com o residual de 40mm, 30mm e o número médio que realmente a painél saiu de ciclo por revestimento.

Figura 27 – Gráfico do perfil de desgaste por fiada de ambos os revestimentos



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Diferença entre a vida útil entre os revestimentos



(fonte: elaborado pelo autor)

A análise dos residuais são correlacionados às temperaturas de trabalho em ambos os revestimentos, bem como a basicidade e %FeO + %MnO de chegada ao forno panela, para reduzir o impacto destas variáveis nos resultados dos testes. Além disso, como a aciaria é composta de dois fornos elétricos a arco, os quais produzem tipos diferentes de aços, grau de oxidação do banho distinto e, por sua vez, viscosidade e oxidação diferente da escória, as

panelas com os revestimentos de análise foram acompanhadas para que trabalhem em regime subsequente, diminuindo assim a interferência na análise de residual.

A temperatura de vazamento será monitorada por termopares do tipo K de imersão no banho, a análise de escória realizada nas corridas de lote sequencial com final do lote de produção par, de ambas fornecedoras e analisadas no equipamento (Espectrômetro de fluorescência de raios X – equipamento ARL Advant’X - marca: Thermo Scientific – tubo 1,2kW).

Infelizmente esta aciaria não possui *ladle tracking* (acompanhamento de panelas), o qual indica o tempo em que a panela gasta em todos os estágios quando a panela está em ciclo, bem como o tempo de residência da panela com e sem aço. Por isso a importância de manter as panelas juntas no processo, a fim de minimizar ao máximo a interferência das particularidades desta aciaria.

Foram monitoradas as temperaturas de vazamento das panelas em análise e percebeu-se que não houve diferença significativa entre as temperaturas de vazamento para os diferentes revestimentos como pode ser observado pela tabela 3 e as figuras 29 a 32.

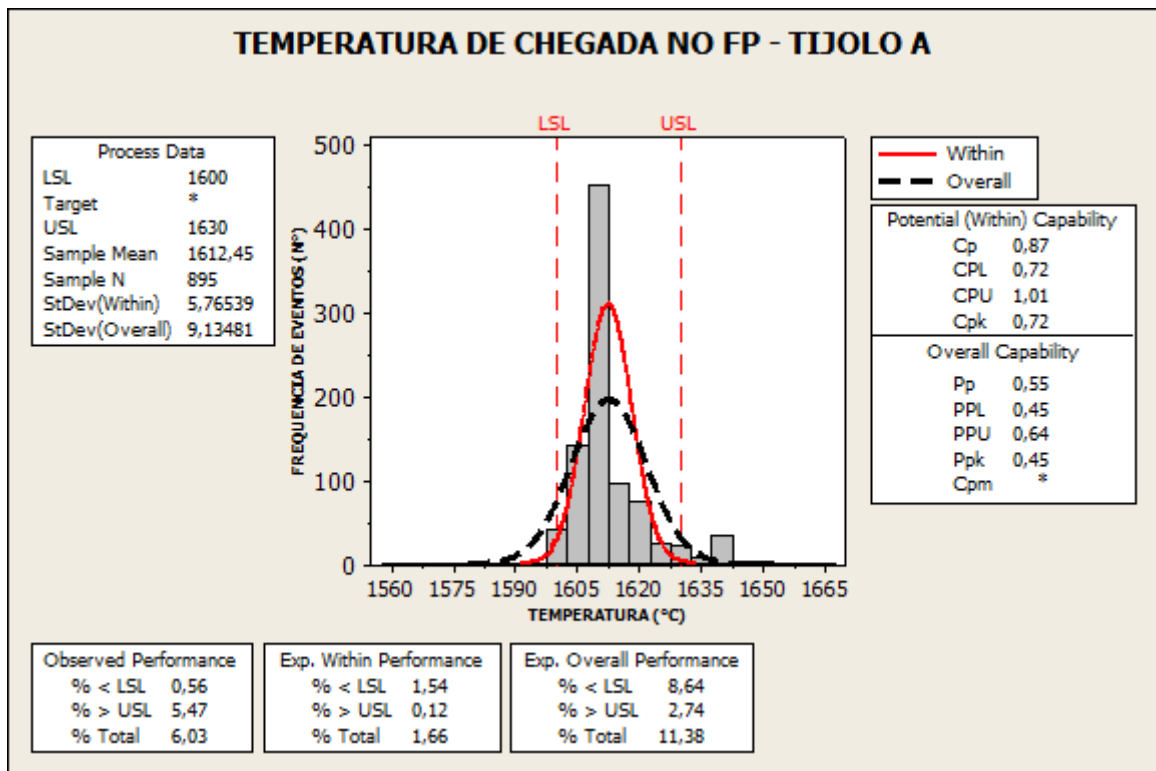
Tabela 3 – Resumo do acompanhamento das temperaturas em (°C)

	T (°C) FORNECEDOR A	T (°C) FORNECEDOR B	DESVIO A	DESVIO B
CHEGADA NO FP	1612,45	1612,57	9,13	8,95
SAÍDA DO FP	1573,48	1574,36	11,19	12,92

(fonte: elaborado pelo autor)

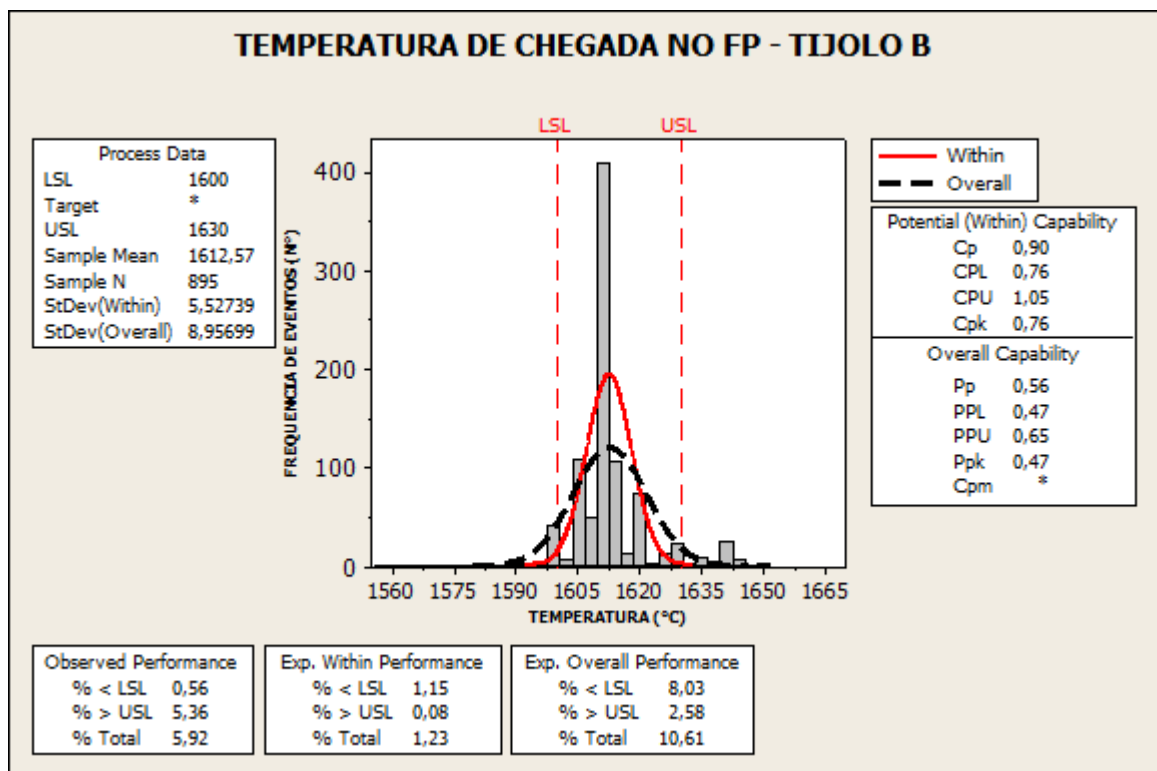
A temperatura de vazamento no FEA é uma medida importante, para se reduzir a variabilidade, adotou-se medir a temperatura de chegada no forno panela. Nota-se que manter as panelas em subsequentes vazamentos as temperaturas não interferem significativamente à análise do presente estudo, uma vez que tanto as temperaturas médias como os seus respectivos desvios são muito similares.

Figura 29 – Temperatura do aço na chegada ao forno panela – tijolo A



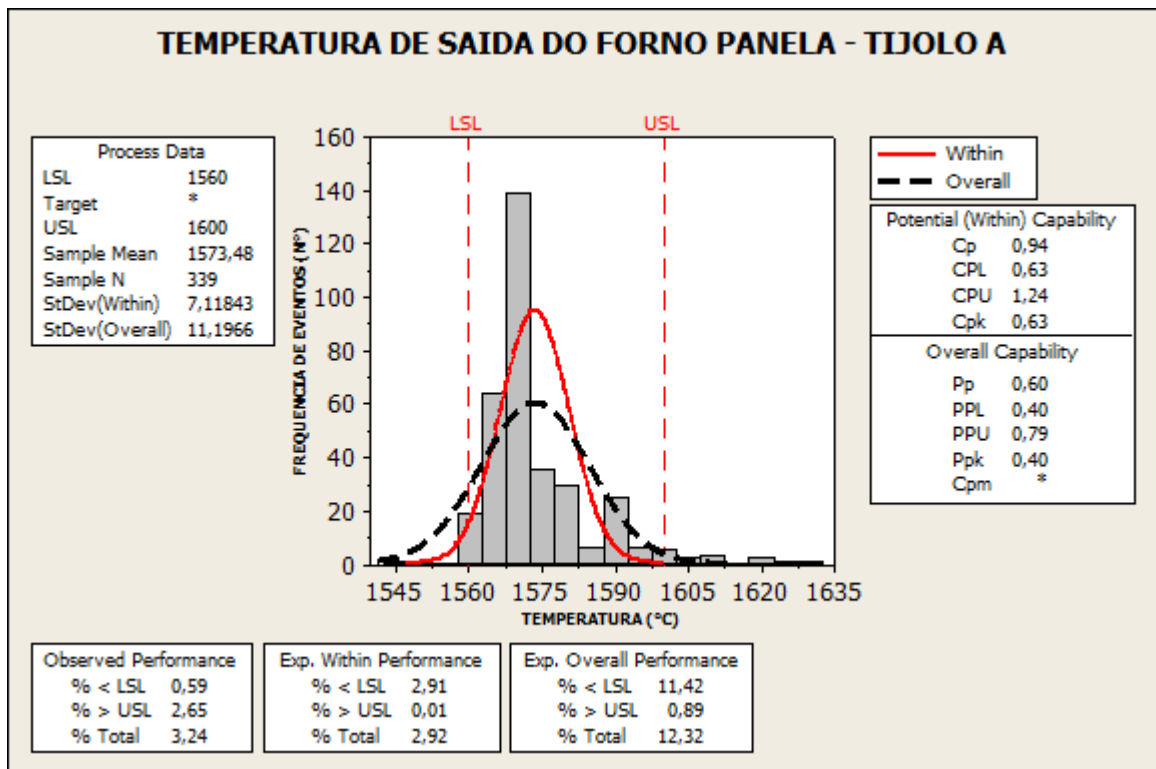
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Temperatura do aço na chegada ao forno panela – tijolo B



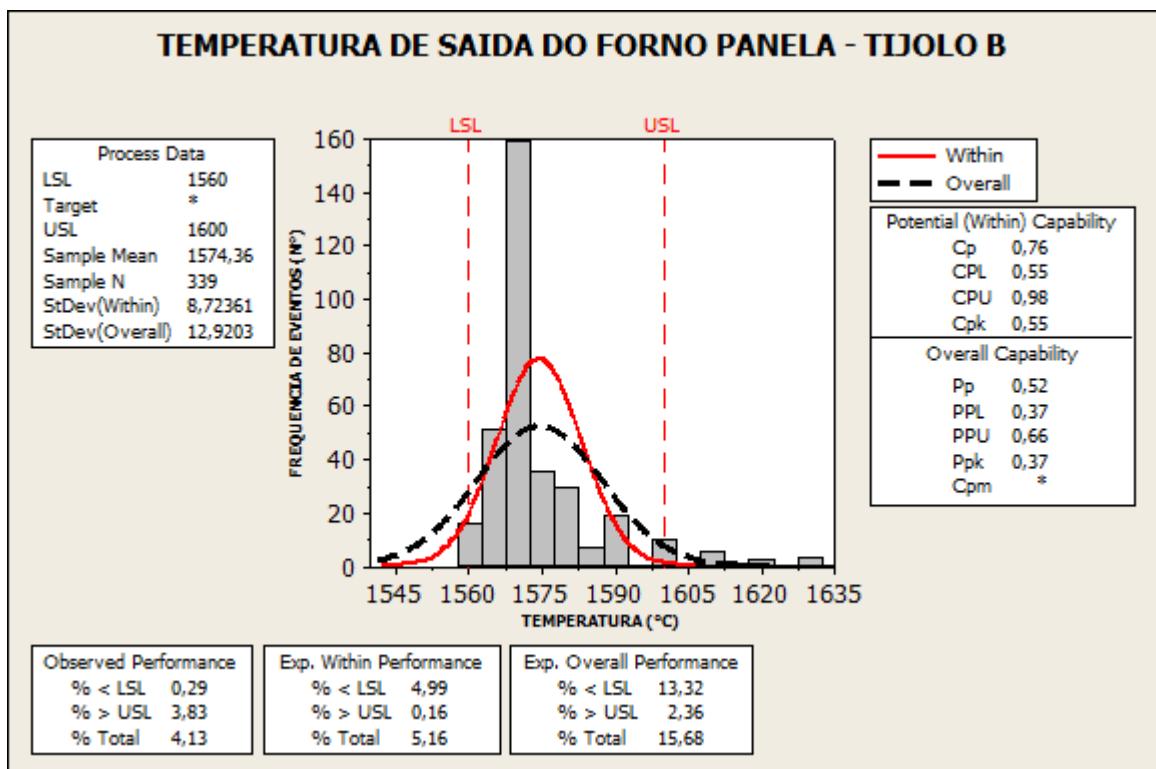
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Temperatura do aço na saída do forno panela – tijolo A.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Temperatura do aço na saída do forno panela – tijolo B



(fonte: elaborado pelo autor)

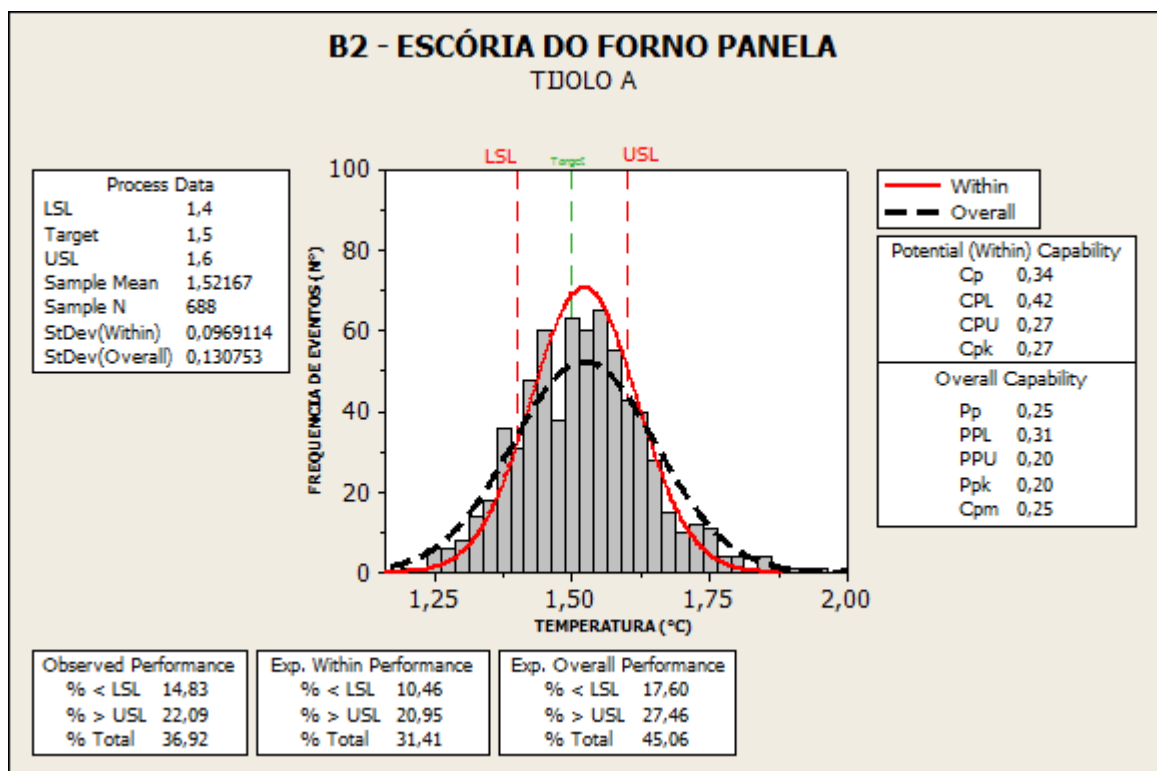
Pelo monitoramento das análises de escórias, a decisão de expor os revestimentos de ambos fornecedores na sequencia de vazamentos foi muito positiva no que se refere a interferência por desgaste químico, pois observa-se que o revestimento do fornecedor A foi submetido a uma condição levemente mais severa no que se refere à degradação química do tijolo provocado pelo sua B2 menor e % FeO + %MnO maior em relação ao fornecedor B, em se tratando de uma aciaria elétrica estes resultados são consideráveis similares, vide pela tabela 4 e as figura de 33 a 36.

Tabela 4 – Resumo do acompanhamento da escória do FP entre fornecedores

	FORNECEDOR A	FORNECEDOR B	DESVIO A	DESVIO B
B2	1,52	1,56	0,13	0,14
%FeO + %MnO	3,59	3,33	1,74	1,37

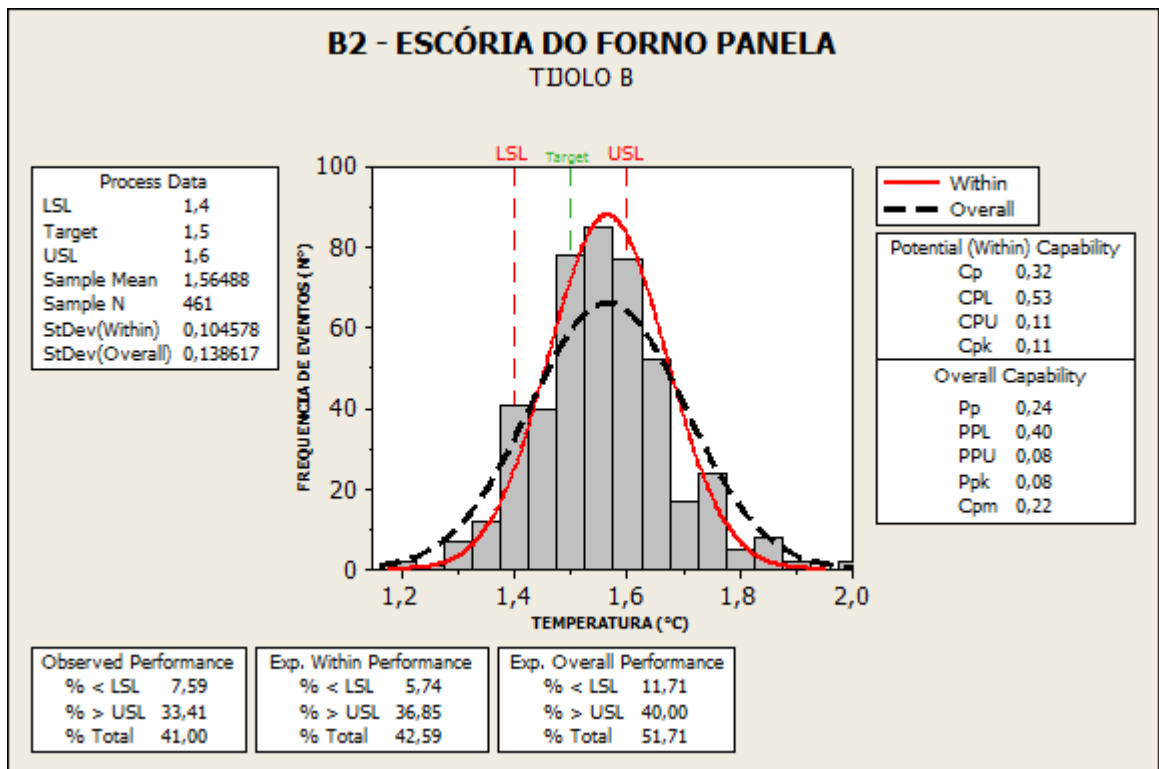
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 – Escória no forno panela – tijolo A



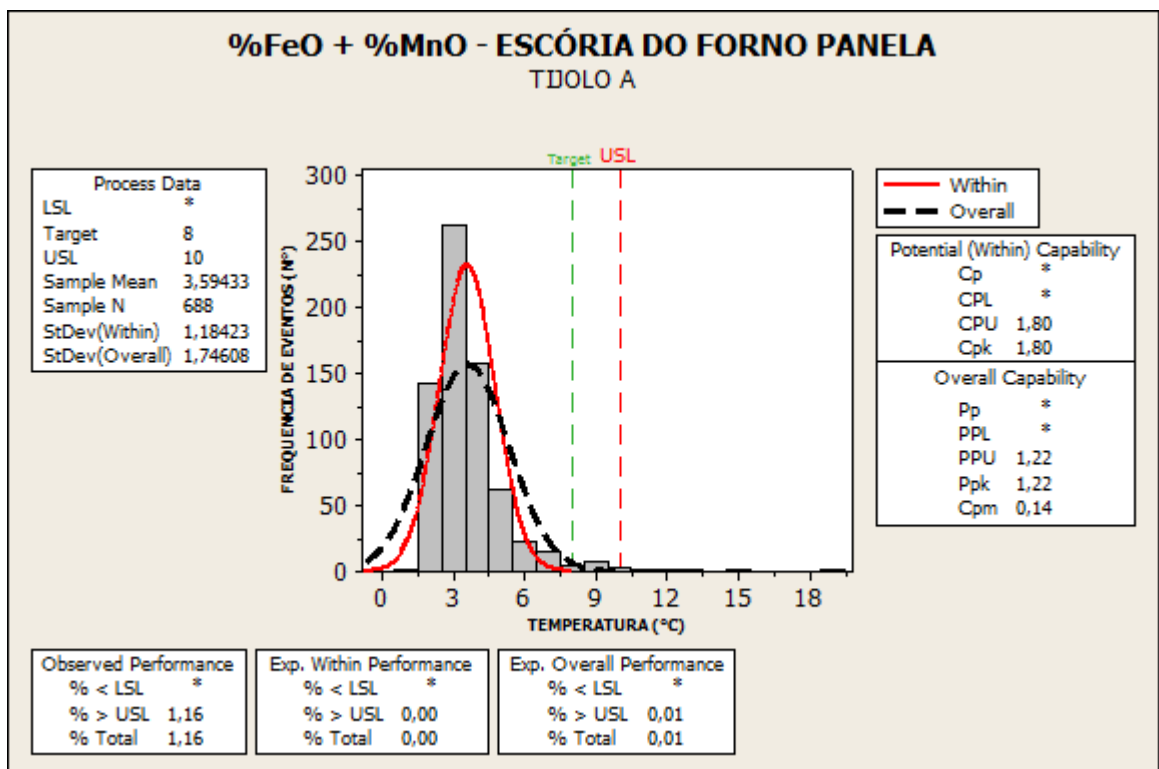
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Escória no forno panela – tijolo B



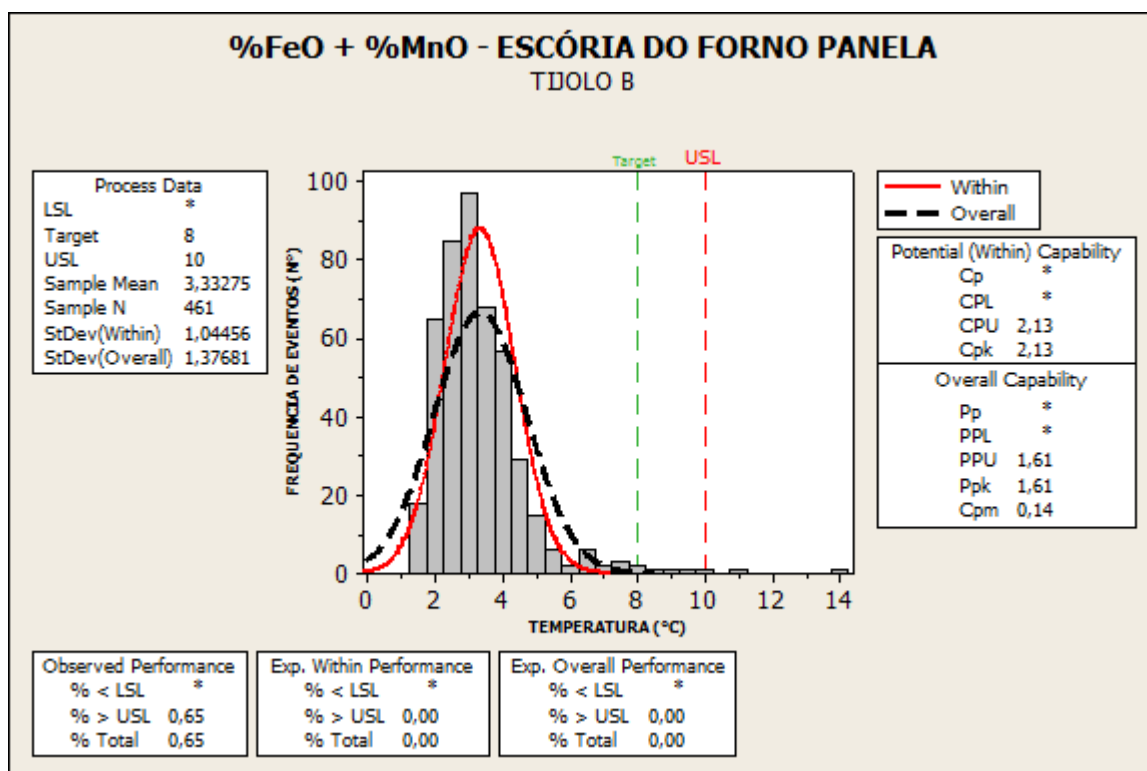
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – % FeO+%MnO Escória do forno panela – tijolo A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – % FeO + %MnO Escória do forno panela – tijolo B



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL COMPARATIVA ENTRE TIJOLOS REFRAATÓRIOS A E B

A investigação da microestrutura dos refratários dolomíticos dos tijolos A e B foi realizada, procurando-se explicar as diferenças de desempenho entre eles, apresentadas nas medições de espessura residual. Assim, analisaram-se diversos aspectos da microestrutura, como a pureza das partículas e agregados, as morfologias das partículas, o tamanho dos poros, presença de grafite, tipos de ligantes (resinas), entre outros.

A microestrutura de um tijolo doloma-C apresenta um aspecto típico, devido à natureza difásica da doloma. Assim, pode-se observar que as partículas sinterizadas apresentam regiões em que ora predomina a magnésia e ora predomina a cal. A microestrutura consiste de cristalitos de magnésia (3-5 μ m) em uma matriz de cal (JANSSON,2008; RICHMOND, 2004).

Em princípio, todos os produtores de refratários conhecem bem as propriedades e requisitos para se fabricar materiais de alta qualidade, de modo que os refratários de panelas

de aciaria dificilmente vão se distinguir em termos de propriedades macroestruturais, tais quais, resistência mecânica, porosidade, rugosidade, etc. No entanto, suas propriedades podem variar quanto aos aspectos microestruturais, os quais vão depender do processo de fabricação e da escolha das matérias-primas, diferenciando-os em termos de distribuição de tamanho de partículas e principalmente na pureza dos grãos que, por sua vez, determinarão o custo dos refratários. A aposta nestas características explica o melhor desempenho dos refratários na prática industrial. Neste estudo, procurou-se propor uma metodologia de análise para os referidos refratários:

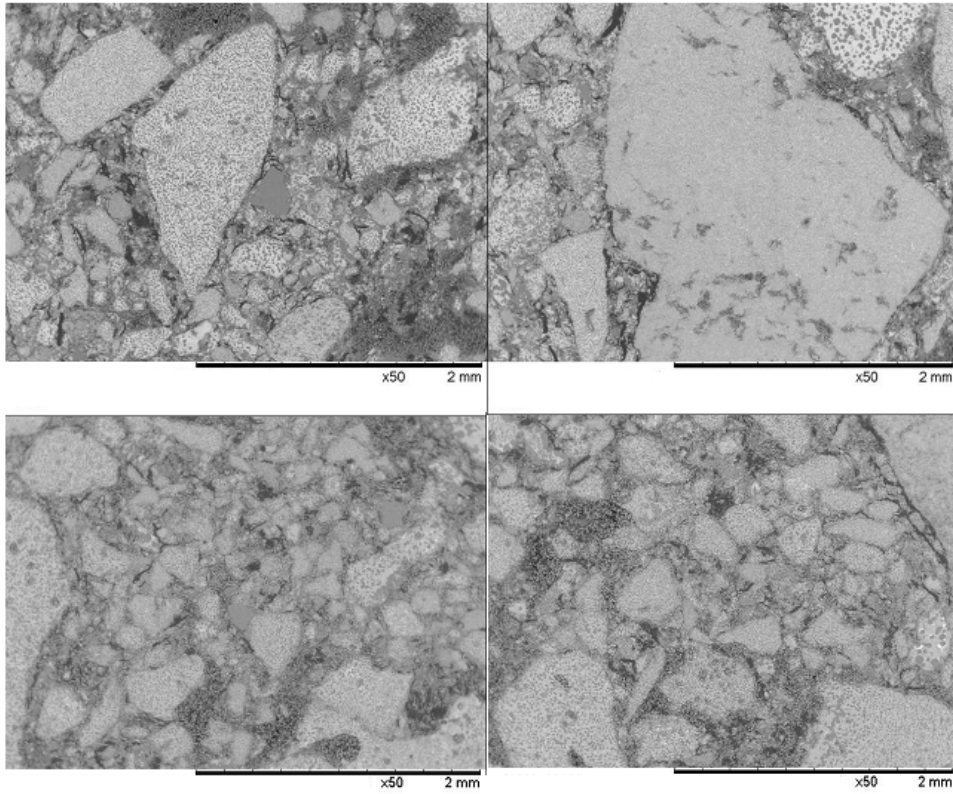
1. Análise geral da qualidade dos agregados e matriz: formato dos agregados, macroimpurezas, distribuição de tamanhos de partículas e presença de partículas eletrofundidas.
2. Pureza dos grãos e partículas: análise da composição química via EDS.

5.2.1 Análise geral da qualidade dos agregados e matriz

Neste item, procurou-se analisar as diferenças referentes à distribuição de tamanhos de agregados, formatos, tamanho dos agregados, qualidade destes em termos de presença de porosidade e macroimpureza. Na matriz, observa-se a presença de partículas finas e, igualmente, a presença de porosidades e impurezas, e o tipo de carbono presente. Quanto aos agregados (partículas maior que ~150µm), observa-se seu tamanho, tipo e distribuição.

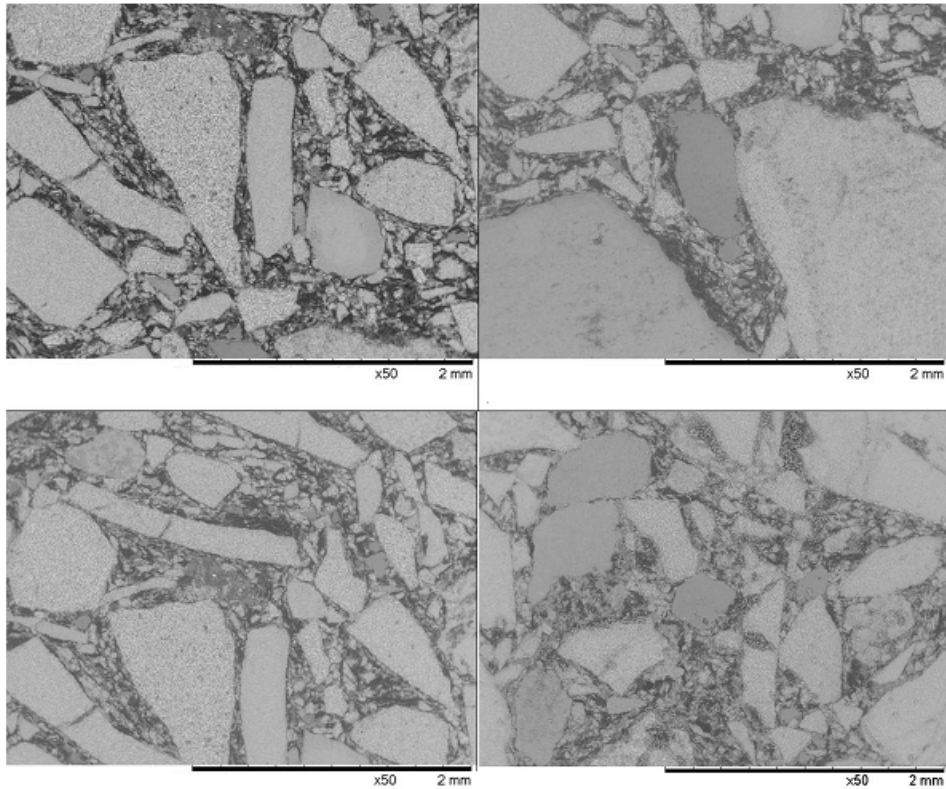
Na análise de distribuição de tamanho de partículas, observa-se que a microestrutura não demonstra diferenças muito acentuadas entre os tijolos A e B (figuras 37 e 38), apresentando tipicamente, desde partículas finas até agregados mais grosseiros. No entanto, pode ser observada que a microestrutura do tijolo A é bem mais homogênea apresentando agregados de doloma sinterizadas dispersos em uma matriz a base de piche e muito bem distribuída desde agregados grandes aos pequenos, sem a presença de trincas. Há uma ótima distribuição de partículas médias e finas, o que favorece o empacotamento, ao aumento da tenacidade à fratura deste tijolo e a resistência à corrosão. Os agregados se mostram mais arredondados, sem pontas agudas. Lee e Iqbal (1999) mostraram em seu trabalho que os agregados tendem a ficar arredondados após a corrosão, portanto, uma microestrutura com agregados mais arredondados intrinsecamente, favorece a resistência à corrosão.

Figura 37 – Visão geral da microestrutura (tijolo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

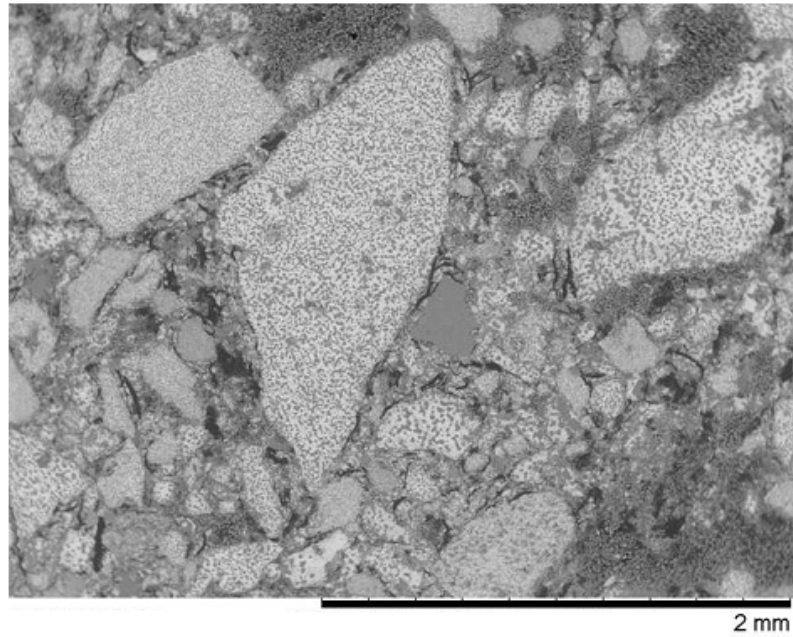
Figura 38 – Visão geral da microestrutura (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

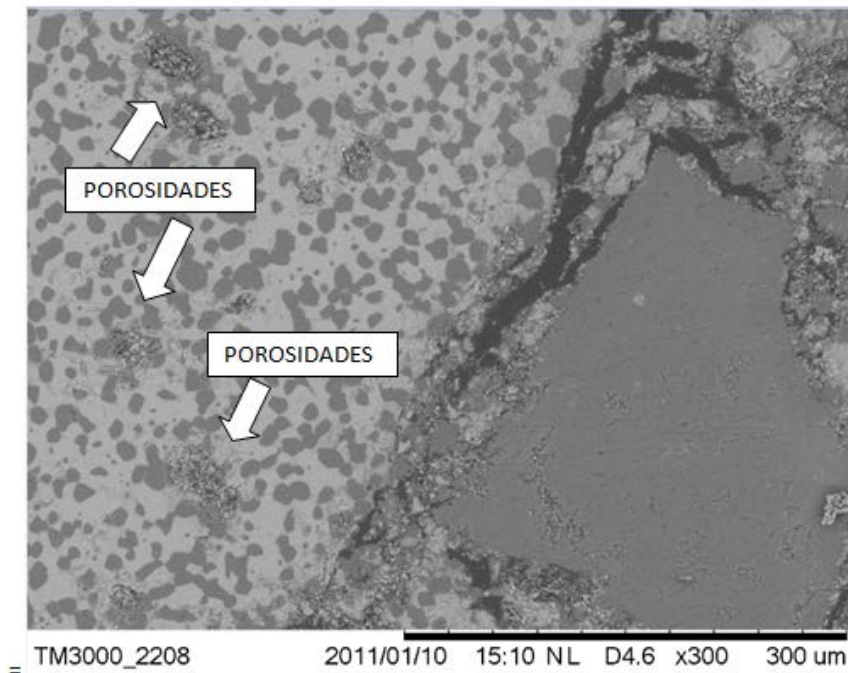
As amostras dos dois tijolos demonstram agregados com presença de porosidade interna (figuras 39 a 40). De acordo com a literatura, a quantidade apresentada está dentro do esperado. Nessa análise não se observou uma diferença significativa entre os tijolos. Ambos refratários apresentaram ampla distribuição de carbono na microestrutura.

Figura 39 – Aspecto dos agregados (tijolo A)



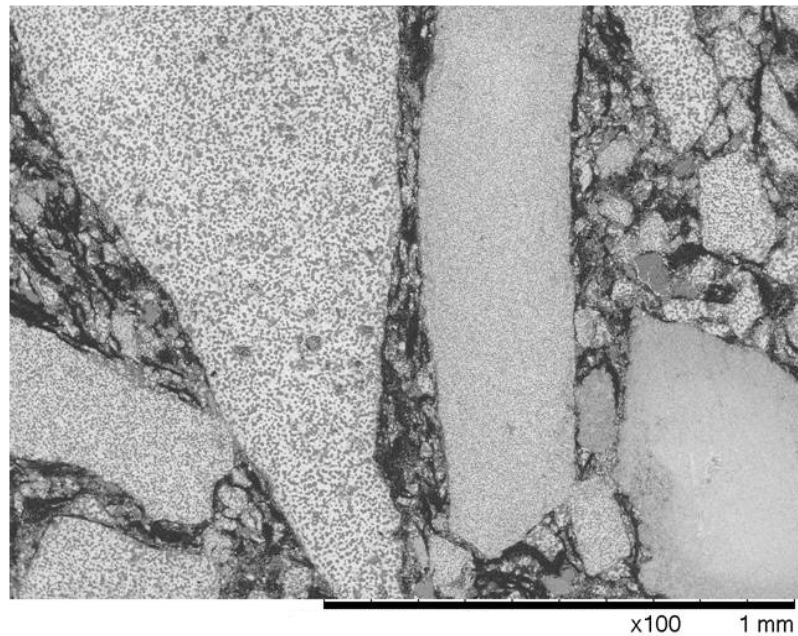
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Aspecto dos agregados em maior magnitude (tijolo A)



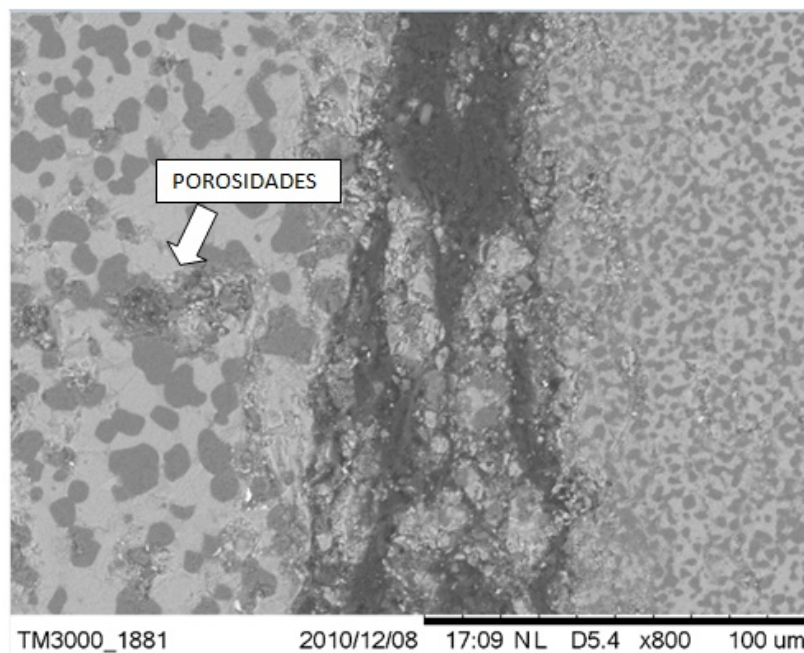
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Aspecto dos agregados (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Aspecto dos agregados em maior magnitude (tijolo B)

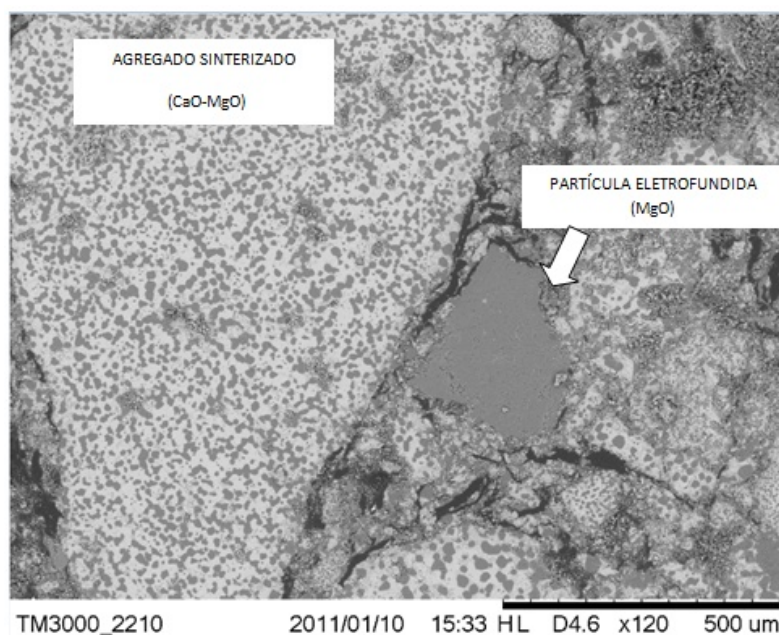


(fonte: elaborado pelo autor)

A utilização de partículas eletrofundidas tem demonstrado uma melhora no desempenho de refratários, aumentando a vida útil dos mesmos, sendo um fator consagrado em termos de melhora da microestrutura de refratários, como demonstram diversos estudos já publicados (Iqbal e Lee, 2004). Face a isso, verificou-se na análise microestrutural esse fator. Em

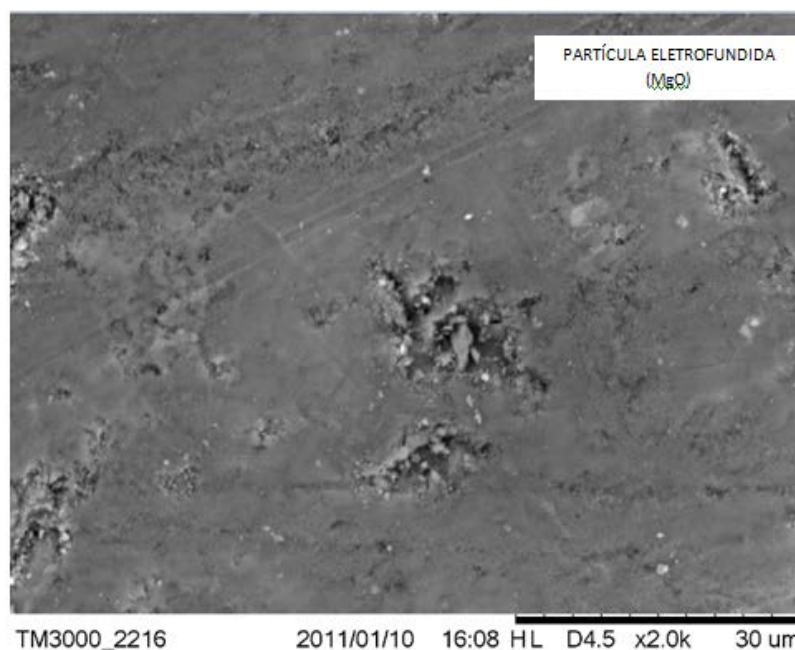
partículas sinterizados, a microestrutura de um refratário dolomítico apresenta em seus grãos, cristalitos de magnésia (3-5 μm , cor cinza escuro) em uma matriz de cal (cor branca), portanto, facilmente diferenciados de partículas eletrofundidas (figura 43). A Figura 44 mostra em detalhe o aspecto de forte sinterização do material eletrofundido.

Figura 43 – Presença de partícula eletrofundida (tijolo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

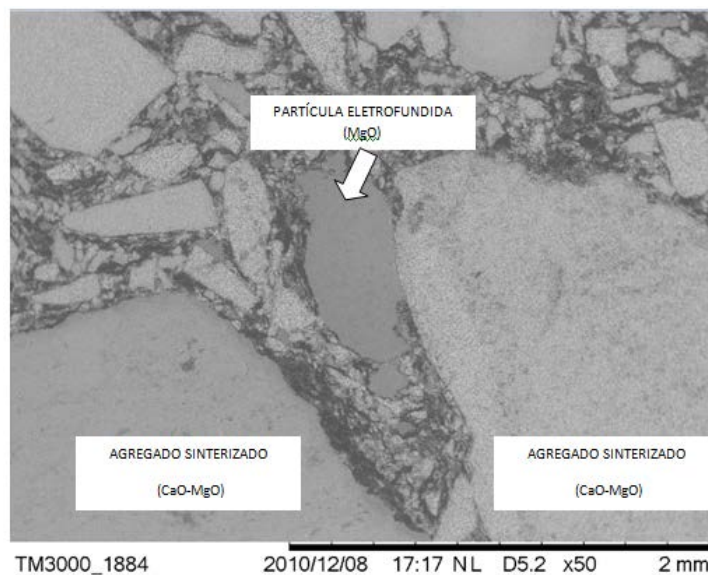
Figura 44 – Detalhe de partícula eletrofundida em elevada magnitude (tijolo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

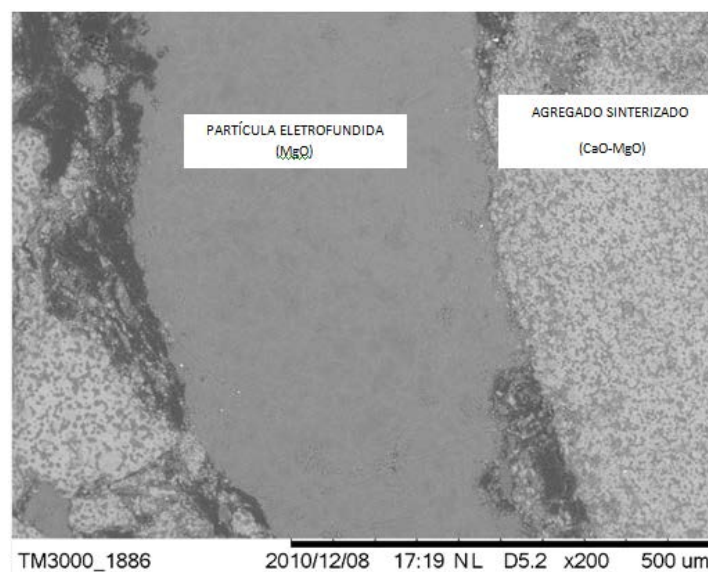
A ausência de partículas eletrofundidas por si só poderia explicar o desempenho inferior do refratário do tijolo B, entretanto, observou-se também a presença das mesmas nesse refratário (figuras 45 e 46). Portanto, esse fator, em princípio, não explica a diferença de desempenho entre os tijolos dos diferentes fabricantes, já que elas apareceram nos dois tipos de refratário e em quantidades, aparentemente, semelhantes. Destaca-se que a quantidade de partículas eletrofundidas é pequena na microestrutura, ocorrendo em partículas de tamanho menores ($< 500 \mu\text{m}$).

Figura 45 – Presença de partícula eletrofundida (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 46 – Detalhe de partícula eletrofundida. (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2 Investigação da pureza dos refratários: análise da composição química via EDS

Nesta análise, procurou-se encontrar a presença de contaminantes, os quais diminuem a resistência à corrosão de escórias, principalmente, por atuarem formando compostos eutéticos. A presença de fundentes muito enérgicos como os alcalinos sódio e potássio, não era esperada, em tais refratários de alta qualidade. Assim, os principais fundentes são o ferro e o silício. Impurezas comuns, proveniente das matérias-primas dolomíticas, além do ferro e silício, são alumina, manganês, enxofre e fósforo. O máximo recomendado dessas impurezas é 2,5%, considerando-se CaO + MgO 97,5%. Análises pontuais como por EDS não são indicadas para a quantificação de elementos químicos, no entanto, são bastante úteis para detecção de impurezas presentes na microestrutura.

5.2.2.1 Impurezas Pontuais

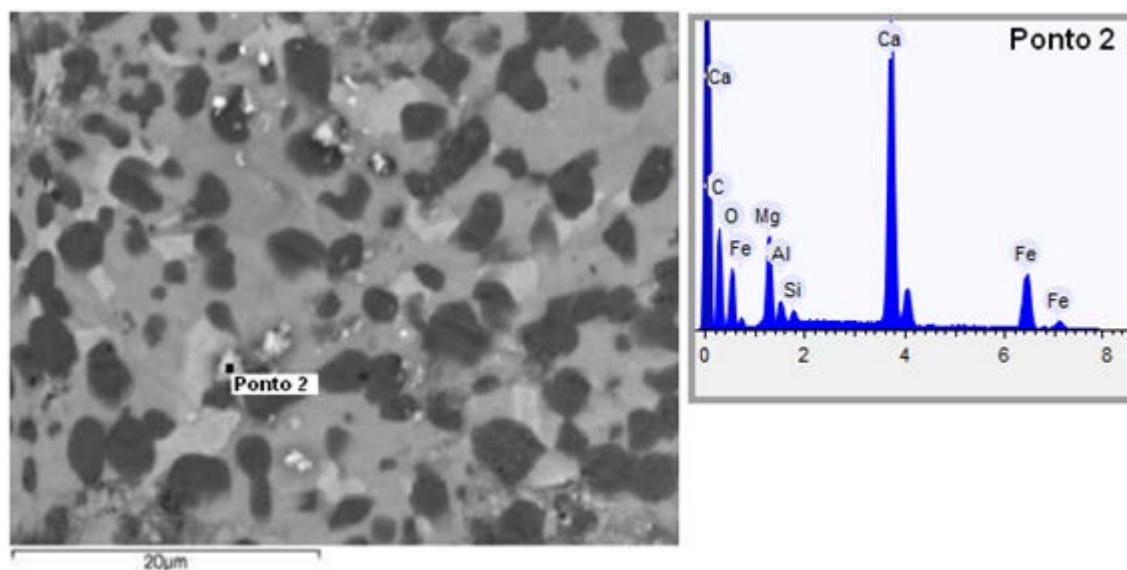
A observação geral da microestrutura revelou a presença de impurezas distribuídas na microestrutura. Utilizando-se a técnica de análise por microsonda por energia dispersa (EDS), realizou-se a análise dessas partículas. A tabela 5 e a figura 47 mostram um contaminante de ferro no refratário do tijolo A.

Tabela 5 – Composição do ponto 2, na Fig. 47. Tijolo A

Elemento	(%) em peso
C	15,2
Mg	3,4
Al	0,7
Si	0,3
Ca	16,2
Fe	10,9
O	53,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 47 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise pontual via EDS



(fonte: elaborado pelo autor)

Procedeu-se então a busca de impurezas para refratários do tijolo B (Tabelas 6 e 7; Figuras 48 e 49).

Tabela 6 – Composição do ponto 1, na Fig. 48

Elemento	(%) em peso
C	28,9
Mg	6,3
Mn	0,7
Si	2,6
Ca	5,6
Fe	40,5
O	15,5

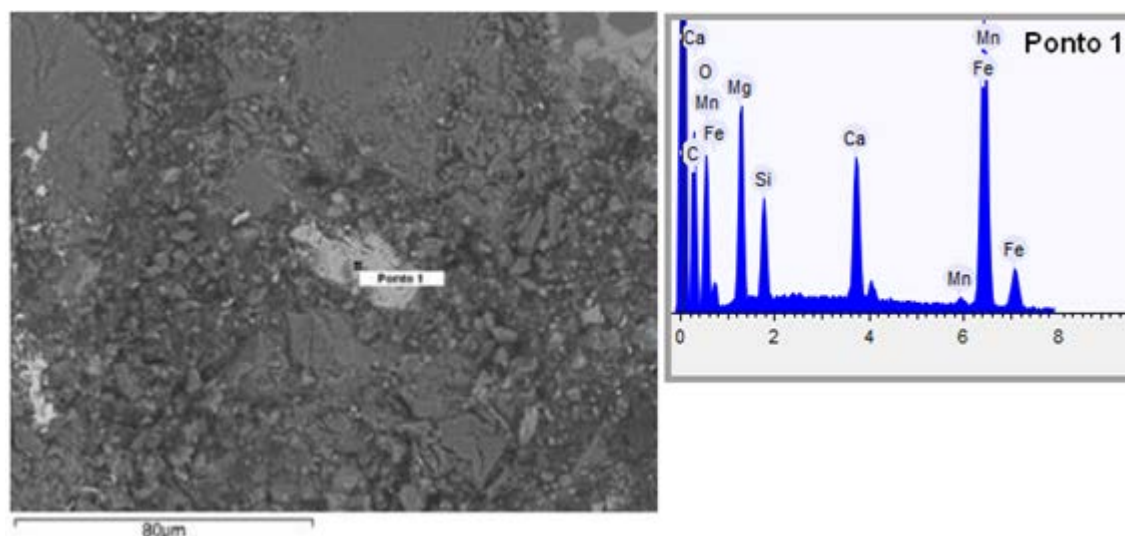
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 7 – Composição da região 1, na Fig. 49

Elemento	(%) em peso
C	29,5
Mg	11,0
Al	0,2
Si	1,1
Ca	9,7
Fe	21,8
O	26,7

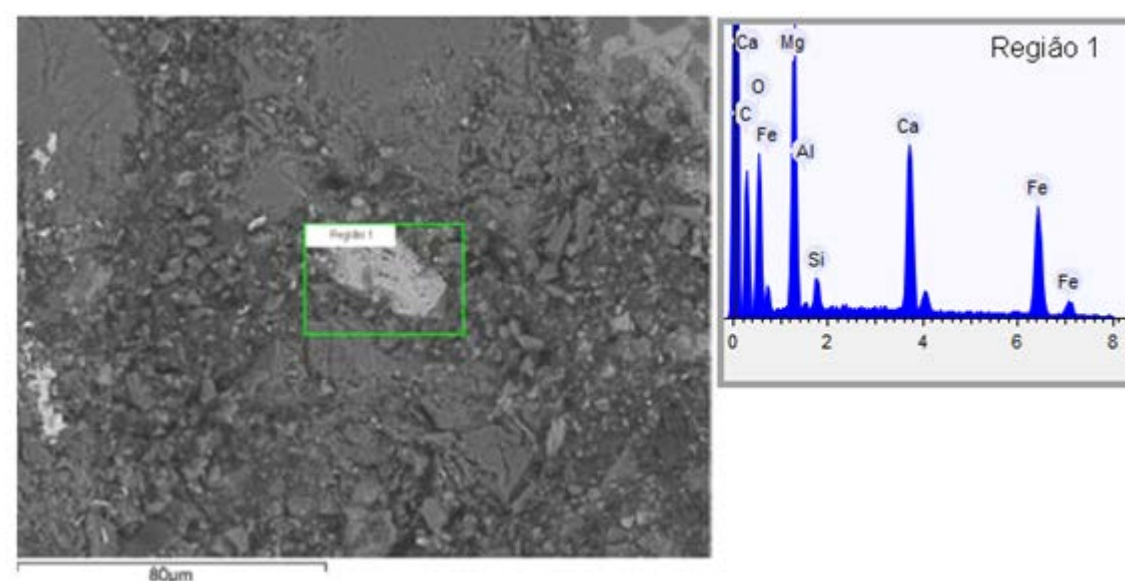
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise pontual via EDS (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Presença de impureza de ferro na microestrutura – análise da região selecionada, via EDS (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

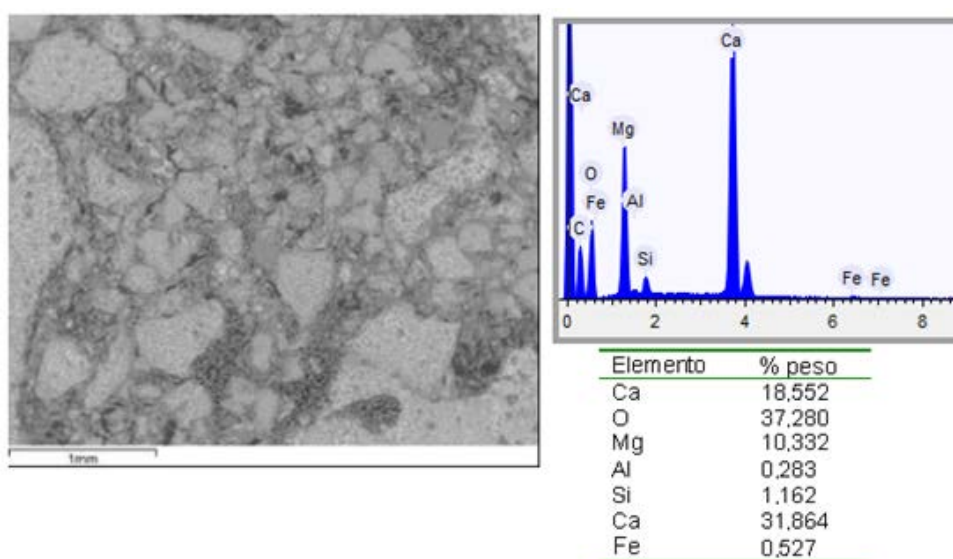
Como conclusão do estudo acima (Figuras 47 a 49), pode-se dizer que o tijolo B apresentou uma contaminação de ferro grosseira em sua matriz, sendo um indicativo de pior qualidade desse refratário, em relação ao tijolo A. Este igualmente apresentou impureza de ferro, porém de menor tamanho e disperso pela microestrutura.

5.2.2.2 Mapeamento

Neste procedimento, faz-se a busca por impurezas, pela técnica de análise de uma área selecionada ou de toda a microestrutura. É possível se encontrar, por exemplo, impurezas nos agregados e na matriz, destacados pela análise de um elemento.

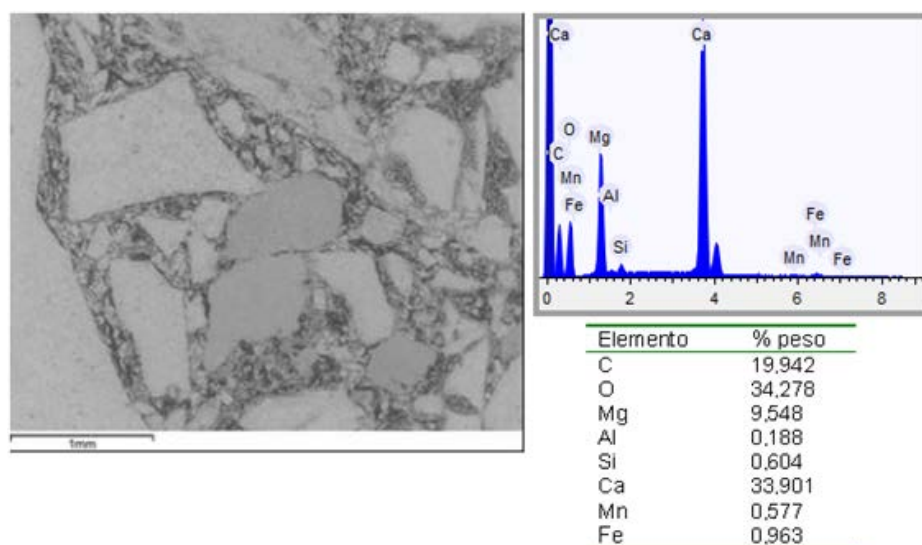
Analisando-se a composição de toda uma região de microestrutura por EDS, verifica-se uma composição bastante próxima entre os dois tipos de refratários (Figuras 50 e 51).

Figura 50 – Análise da microestrutura via EDS (tijolo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

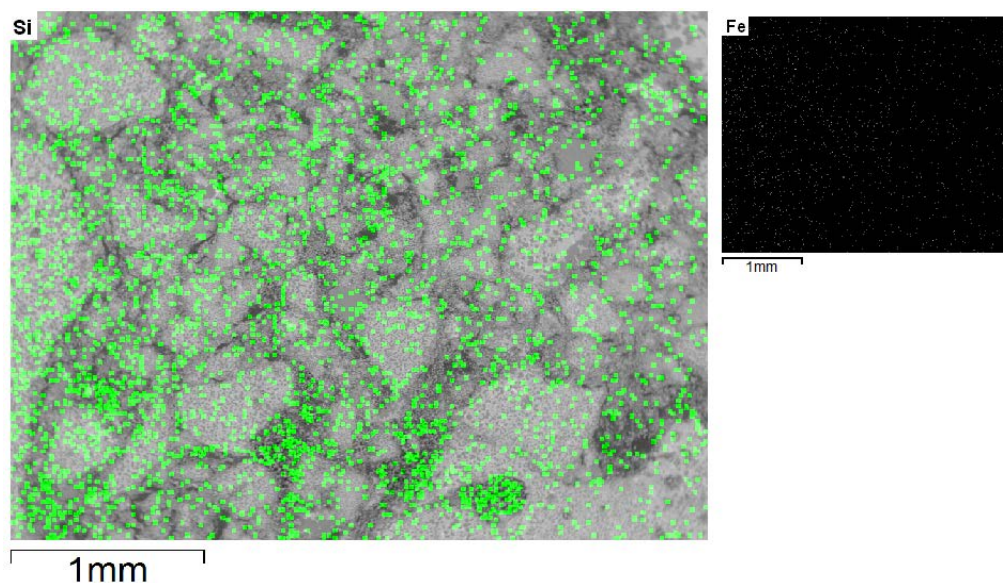
Figura 51 – Análise da microestrutura via EDS (tijolo B)



(fonte: elaborado pelo autor)

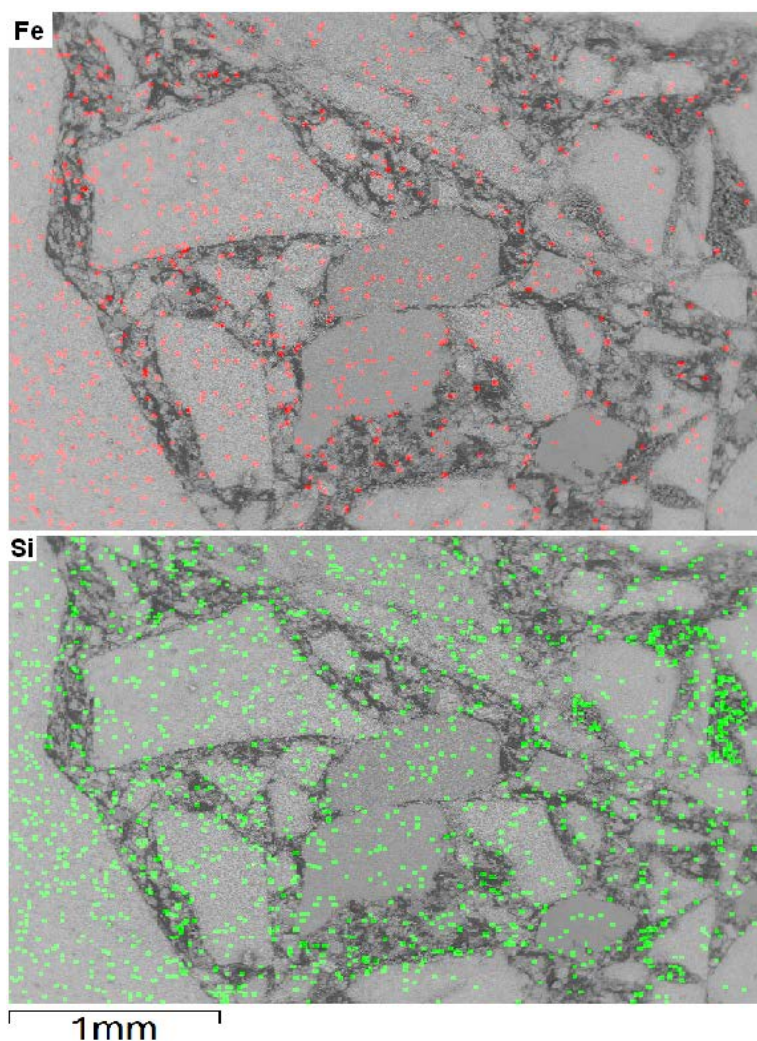
Ambos refratários apresentam ampla distribuição de Fe e Si nos agregados e matriz (Figuras 52 e 53). Entretanto, o ferro mostra-se mais disperso, já que o silício tende a apresentar uma concentração em determinados pontos da matriz. É possível se inferir que esses pontos sejam mais susceptíveis à corrosão, após a perda de carbono, devido à formação de silicatos de menor refratariedade. A região analisada da microestrutura do tijolo A demonstrou maior concentração de Si, aproximadamente o dobro em relação ao tijolo B. No entanto, não chega a ser um fator de diferença entre os dois tijolos, já que os teores ainda são baixos.

Figura 52 – Distribuição de ferro e silício na microestrutura (tijolo A)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 53 – Distribuição de ferro e silício na microestrutura (tijolo B)

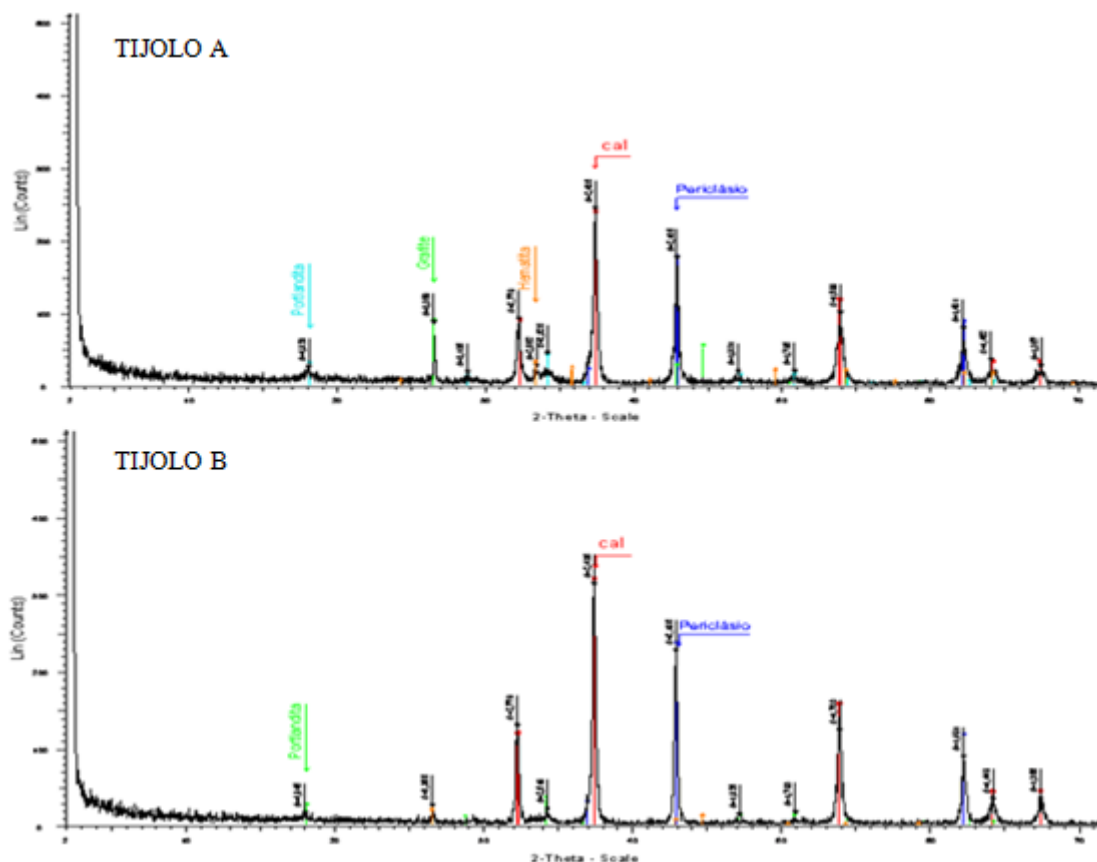


(fonte: elaborado pelo autor)

5.3 ANÁLISE DAS FASES POR DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A análise por difração de raios X revela, principalmente, as fases dominantes da cal e periclásio, as quais formam a doloma, nos refratários dos dois tijolos. Nota-se também presença de carbono grafite na estrutura do tijolo A e o mesmo não foi observado no tijolo B, conforme mostra a Figura 54.

Figura 54 – Análises das fases por difração de raios X para os tijolos A e B



(fonte: elaborado pelo autor)

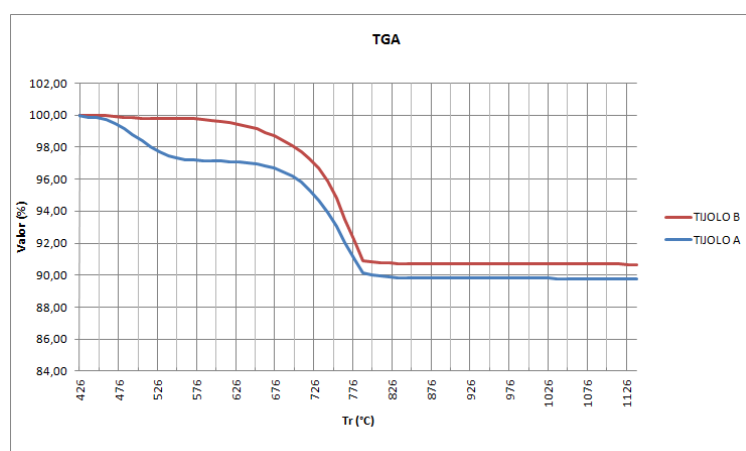
Uma observação importante é que duas das seis panelas do tijolo B apresentou perda de grande massa do revestimento quando a panela entrava no ciclo, o mesmo fenômeno não foi observado no revestimento do tijolo A, o que pode ser facilmente explicado pela presença do carbono em sua fase alotrópica grafite no tijolo A, justamente com uma microestrutura mais favorável a resistência ao choque térmico, como revelou a análise microestrutural.

Refratários dolomíticos empregados em escórias com sílica devem atuar de modo a promover a formação e manutenção da camada protetora de silicato de dicálcio (C_2S), a qual atua como uma barreira passivadora em relação à corrosão (RICHMOND, 2004). Portanto, a chave para o melhor desempenho de um refratário, pode ser sua resistência ao choque térmico.

5.4 ANÁLISES TÉRMICAS

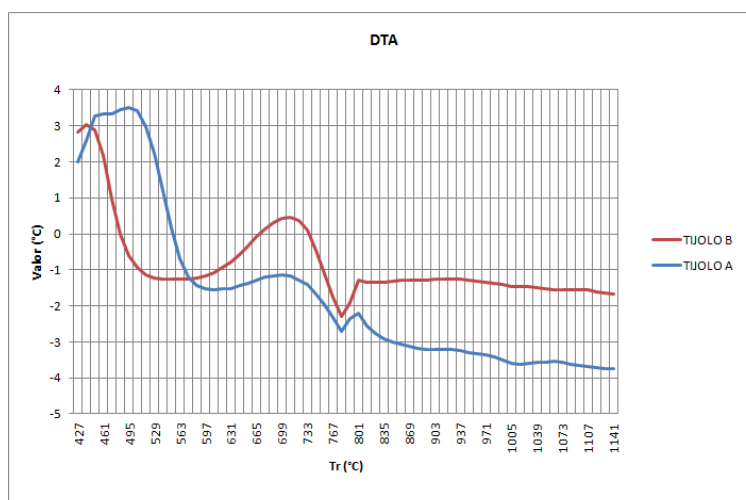
As análises térmicas mostradas nas figuras 55 e 56 apontam para pequenas diferenças entre os tijolos. A análise termogravimétrica mostra perda de massa a partir de ~200°C até 750°C (figura 55). Já análise termodiferencial mostra tipicamente a ocorrência de reações exotérmicas nestas regiões (figura 56). Portanto, pode-se concluir a ocorrência de material orgânico, tipicamente resinas ligantes e principalmente o carbono, seja na forma pirolítica ou como grafite.

Figura 55 – Análise termogravimétrica.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 56 – Análise térmica diferencial.

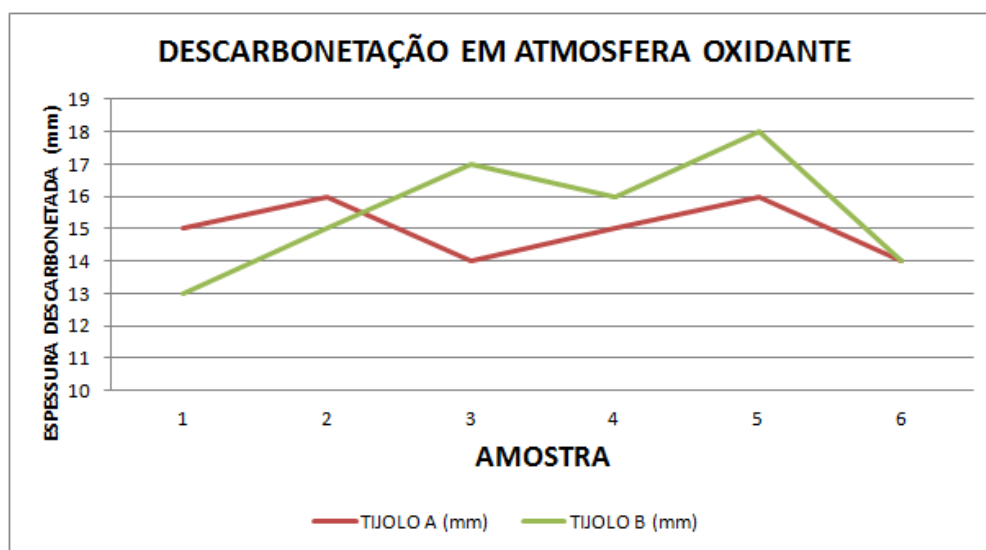


(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 ANÁLISES DA TAXA DE OXIDAÇÃO

Os resultados revelaram que ambos os tijolos possuem características muito semelhantes a resistência a oxidação quando novos, como pode ser visto pela figura 57. A faixa descarbonetada para o tijolo A foi de 15mm enquanto para o tijolo B foi de 15,5mm, basicamente iguais, validando assim os resultados obtidos pelas análises térmicas.

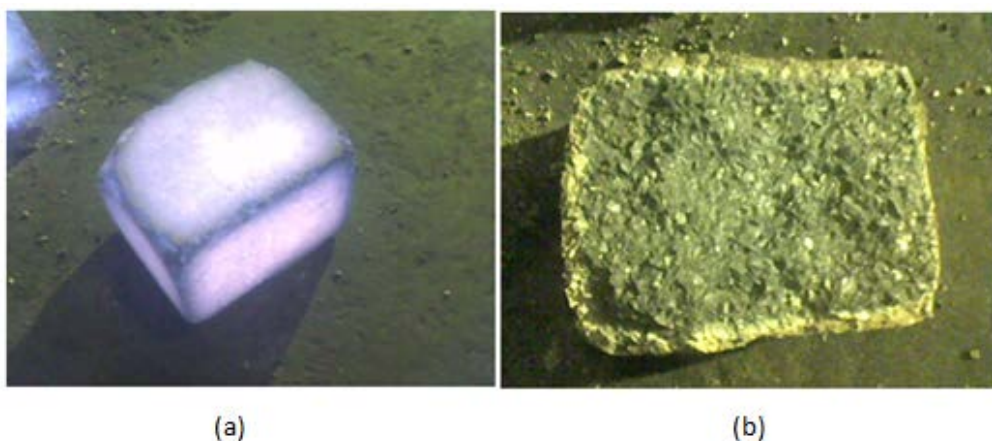
Figura 57 - Descarbonetação dos tijolos em atmosfera oxidante.



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 58 mostra a peça depois de retirada do aquecimento vertical (10h), com os cantos esboroados devido ao manuseio (a) e depois de esfriada à temperatura ambiente por 15h (b).

Figura 58 - Teste de descarbonetação do tijolo



(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos chegou-se às seguintes conclusões:

6.1 QUANTO À MEDIÇÃO DO RESIDUAL DE PANEAS

A panela testada com o tijolo A chegou a uma média de 248 corridas na linha de escória, obtendo um resultado satisfatório quanto à vida da linha de escória de panela dolomítica. O tijolo apresentou uma taxa de desgaste de 0,52 mm/corrída.

O tijolo B atingiu uma vida média de 203 corridas, portanto, inferior ao tijolo do fornecedor A. Sua taxa de desgaste foi de 0,67mm/corrída.

A utilização do refratário A representa um aumento de cerca de 20% em relação ao tijolo B. Isto significa um ganho econômico considerável, diminuindo o número de paradas para troca e manutenção, bem como, com uma taxa de desgaste média menor, uma maior segurança operacional à panela.

6.2 QUANTO À CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS

O tijolo A apresentou uma distribuição de tamanhos, formas de agregados arredondadas, o que lhe garante uma homogeneidade superior em sua microestrutura e maior resistência à corrosão. Observou-se uma ótima distribuição de partículas médias e finas, o que favorece o empacotamento, o que significa um aumento da tenacidade à fratura, é favorável também a uma maior resistência ao choque térmico deste tijolo e à corrosão. Além disso, foi evidenciada a presença de C-Grafite potencializando a resistência ao choque térmico, que impacta diretamente na taxa de desgaste. Esta foi considerada a principal característica para se explicar a melhor performance desses tijolos.

A análise evidenciou a presença de partículas/agregados de doloma sinterizada e eletrofundida em ambos os tijolos. A qualidade (pureza) da matéria-prima (doloma) do tijolo A é superior à do tijolo B, apresentando uma melhor distribuição de impurezas (Fe, Al, Mn, etc), portanto,

menos concentradas que no tijolo B. Há distintas procedências dos agregados sinterizados de doloma na amostra analisada do tijolo B.

A composição química dos dois tijolos é muito semelhante, porém a distribuição das fases, reveladas nas microestruturas, é distinta.

A caracterização microestrutural de tijolos refratários provenientes de diferentes tijolos, como realizada neste trabalho, relacionando-se com o desempenho do tijolo no uso industrial, medida pela espessura residual dos tijolos e número de corridas, pode ser uma ferramenta importante para acompanhamento do melhor desempenho dos refratários em escala industrial. A metodologia proposta fornece subsídios a uma melhor escolha dos diversos parâmetros na manufatura e uso de refratários.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do presente trabalho dá origem a alguns temas a serem estudados futuramente, tais como:

- I. Otimizar as fiadas 14 a 17 para potencializar a vida na panela;
- II. Dirigir um estudo microestrutural focado em um comparativo entre cedés de plug e válvula de diferentes tipos de matéria prima.
- III. Realizar um estudo técnico com o objetivo de aumentar a vida dos refratários periféricos: válvulas, placas, plugs e etc;
- IV. Criar procedimento de controle de acompanhamento da panela em ciclo a fim de otimizar o número de corridas mínimo para garantir um coating no revestimento refratário.
- V. Estudar formas de minimizar o acúmulo de escória no fundo da panela dolomítica;
- VI. Correlacionar residual de segurança e temperatura da carcaça metálica, criando um procedimento que garanta a segurança operacional durante a retirada da panela do ciclo de operação.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. **Comparativo entre tijolos MgO-C e dolomítico para aplicação no revestimento refratário de panela para fabricação de aço de construção mecânica**. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- CARNIGLIA, S. C.; BARNA, G. L. **Handbook of Industrial Refractories Technology: Principles, Types, Properties, and Applications**. New York: Noyes Publications, 1992.
- CARVALHO NETO, J.C, HOFFMAN, A., FIGUEIREDO JUNIOR, A.O. Considerações sobre seleção de refratários para forno panela. **Seminário ABM Aciaria Refratários e Fornos Elétricos**, Rio de Janeiro, p. 429-448, dez. 1989
- CASSÉTE, W.Q. Refratários para Uso em Forno Panela. **Seminário ABM Refratários para siderurgia**, Belo Horizonte, p. 135-152, mar. 2000
- CHIANG, M. H.; YANG, G. I.; LEE, T. F.; DASGUPTA, R.; **American Ceramic Society Bulletin**. n. 67, p 1222-1227, 1988.
- COUTINHO, E.S. Projetos de revestimentos refratários: fundamentos. **Seminário ABM Refratários para siderurgia**. Belo Horizonte: ABM, mar. 2000. p. 97-120.
- FERREIRA, J. P. **Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em painéis de aço na produção de aço ao carbono**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- GERDAU S.A. **ACI – 509 Fundamentos de refratários**. Sistema de capacitação industrial 1998.
- GONÇALVES, G.E. Diagramas de equilíbrio aplicados as escórias e refratários na aciaria elétrica. **Seminário ABM Refratários para siderurgia**. Belo Horizonte, p. 37-54, mar. 2000.
- IQBAL, Y; LEE, W, Am, Fired Percelain Microstructures Revisited. **Journal of the American Ceramic Society**, V. 82, n. 12, dez. 1999, p. 3584 – 3590.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Brasil aqui tem aço**. 2011. Disponível em: <http://iabr.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CFolder_Aco_Brasil_2011_Institucional.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.
- JANSSON, S., BRABIE, V., JONSSON, P. Corrosion mechanism of commercial doloma refractories in contact with CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO slag. **Ironmaking & Steelmaking**. v.5 n.2, p. 99-107, 2008
- KISHIDAKA, H.; UCHIMURA, R.; WATANABE, S. **Taikabutsu**. n. 32, p. 159-162. 1980.

LEE, W.E, ZHANG, S; Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. *International Materials Reviews*.v.44, n.3. Sheffield, UK: Communications Ltd and ASM International,1999. p. 77-104.

LEVIN, E. M.; ROBBINS, C. R.; MCMURDIE, H. F.; RESER, M. K. **Phase diagrams for ceramist**. Columbus, OH, American Ceramic Society. 1964.

MATSUSHIMA, M.; YADOMARU, S.; MORI, K.; KAWAI, Y. A fundamental study on the dissolution rate of solid lime into liquid slag. **Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan**. n. 17, 1977, p. 442-449.

NAKAHARA, T. Innovation in a Borderless World Economy. **Research & Technology Management**. 1997. p. 7-9.

OLIVEIRA, S.P., BRANT, P.O.R.C. Refratários para os processos de refino secundário. **Seminário ABM Refino secundário dos aços**. Belo Horizonte, out. 2005. p. 451-490.

OREHOSKI, M. A.;GRAY, R. D. Ladle Refining Process, **Iron and Steel Engineering**. n. 1. jan. 1986. p. 50-70.

PRETORIUS, E.B.; CARLISLE, R.C. Foamy Slag Fundamentals and Their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking. **Iron & Steelmaker**. v. 26, n. 10, oct. 1999, p. 79-88.

_____. **Utilizing phase diagrams to demonstrate slag principles**.In: **Slag Fundamentals & Phase Diagrams**. Process Technology Group. LWB Refractories, 2002a.

_____. **Slag Fundamentals IV**. Process Technology Group. LWB Refractories, 2002b.

QUINTELA, M. A.; MELO, T. M.;LAGE, I. J.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. **Cerâmica**. n. 47. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132001000400002>. Acesso em: 20 jun. 2012.

RELLERMEYER, H. Degassing and Ladle Treatment for Production of Special Steel Grades. **Metallurgical Plant and Technology – MPT Internacional** . v. 1. Arte e Ciência, 1986.

SCHACHT, C.A. **Refractories Handbook**. Marcel Decker , 2004.

SEGADÃES, A.M. **Refratários**. 1rd ed. Portugal : Aveiro. 1997.

SLAG ATLAS. 2nd ed.. Germany: Verein Deutscher Eisenhüttenleute,1995.

TURKDOGAN, E. T. **Ironmaking & Steelmaking**. n. 12, 1986, p. 64-77.