

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE-3M**

**COMPARATIVO ENTRE TIJOLOS MgO-C e DOLOMÍTICO PARA  
APLICAÇÃO NO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO DA PANELA  
PARA A FABRICAÇÃO DE AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA**

**Fabiano de Andrade**

**Engenheiro Metalúrgico**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade  
Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre

2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE-3M**

**COMPARATIVO ENTRE TIJOLOS MgO-C e DOLOMÍTICO PARA  
APLICAÇÃO NO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO DE PANELA  
PARA A FABRICAÇÃO DE AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA**

**Fabiano de Andrade  
Engenheiro Metalúrgico**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre - RS  
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fábio Domingos Pannoni – Grupo GERDAU

Prof. Dr. Nestor Heck - UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar F. Vilela - UFRGS

Prof. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE-3M

**A minha vó, tia, esposa e filho.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que participaram da elaboração desse trabalho, em especial a empresa Magnesita, na figura do assistente técnico Mateus Vargas Garzon, do residente Eros Jose Talevi e do Gestor de Conta Felipe Nonaka.

Agradeço também a Aços Especiais Brasil - Unidade Charqueadas, na figura do Eng° João Luiz Boschetti, por disponibilizar tempo para que pudéssemos desenvolver esse trabalho, que é de vital importância para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao professor Carlos Pérez Bergmann, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também a minha família, nas figuras de minha amada esposa Elisângela Aquino de Souza, meu querido filho Augusto de Souza Andrade e minha cunhada Tais Aquino de Souza e seu filho Nicolas Souza.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>5</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
3.1 METALURGIA DAS PANELAS.NA ACIARIA ELETRICA.....	6
3.1.1 Panela – Formato e Revestimento Refratário.....	8
3.1.1.1 Revestimento Permanente.....	10
3.1.1.2 Revestimento de Borda Livre (ou Free Board).....	11
3.1.1.3 Revestimento de Linha e Escória.....	11
3.1.1.4 Revestimento de Linha de Metal.....	12
3.1.1.5 Revestimento de Fundo.....	13
3.1.1.6 Sedes de Plugs e Válvulas .....	13
3.2 DEGRADAÇÃO DE REFRATÁRIOS EM PANELAS.....	13
3.2.1 Origem das solicitações.....	13
3.2.1.1 Fatores Operacionais.....	14
3.2.1.2 Fatores Associados ao Projeto e Montagem.....	16
3.2.2 Tipos de Degradação dos Materiais Refratários.....	17
3.2.2.1 Desgaste .....	17
3.2.2.2 Termoclase.....	18
3.2.2.3 Corrosão.....	18
3.3 REFRATÁRIOS DOLOMÍTICOS.....	20
3.3.1 Propriedades.....	21
3.4 REFRATÁRIOS MGO-C.....	23
3.4.1 Propriedades.....	24
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 MATERIAIS.....	27
4.2 MÉTODOS.....	27
4.2.1 Densidade e Porosidade Aparente.....	27
4.2.2 Resistência a Compressão a Temperatura Ambiente.....	29
4.2.3 Módulo de Elasticidade .....	30
4.2.4 Teste de Refratariedade sob Carga.....	31
4.2.5 Resistência ao Ataque de Escória .....	33
4.2.6 Resistência ao Choque Térmico e Termoclase.....	34

4.2.7 Microscópio Eletrônico de Varredura.....	36
4.2.8 Análises da Espessura de Residuais.....	36
4.2.9 Perfil Térmico das Painelas.....	37
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURA.....	39
5.1.1 Composição Química.....	39
5.1.2 Microestrutura.....	40
5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS.....	41
5.2.1 Densidade e Porosidade Aparente.....	41
5.2.2 Resistência à Compressão a Temperatura Ambiente.....	42
5.2.3 Módulo de Elasticidade.....	42
5.2.4 Refratariedade sob Carga.....	42
5.2.5 Resistência ao choque Térmico.....	44
5.3 RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE ESCÓRIA.....	45
5.3.1 Análise pelo Ensaio de Resistência ao Ataque de Escória.....	45
5.3.2 Análises dos Resíduos após Campanha.....	45
5.4 ANÁLISE DO PERFIL TÉRMICO DA PAINELA EM OPERAÇÃO...	47
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>52</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolução do consumo de aço no Brasil ao longo dos anos. Fonte: Steel Statistics Archives.

Figura 3.1 Panela nas etapas de produção do aço, utilizada como reservatório, e no caso do forno panela e desgaseificador como reator.

Figura 3.2 Desenho esquemático de uma panela, em corte, indicando as zonas/partes constituintes.

Figura 3.3 Esquemática do processo de dissolução do refratário pela escória em função da microestrutura

Figura 3.4 Diagrama de fase CaO – MgO que representam os refratários dolomíticos.

Figura 3.5 Molhamento dos refratários com e sem C em sua composição química.

Figura 3.6 Comparação entre estruturas com GE (Grão Eletrofundido) e GS (Grão Sinterizado). Aumento da lupa em (A) 20x e (B) em 50x.

Figura 3.7 Diagramas de fase do sistema MgO-óxido de ferro. (A) em contato com ferro metálico e (B) em contato com o ar.

Figura 3.8 Grãos com e sem impurezas na matriz

Figura 3.9 Formação da zona densa de MgO no tijolo refratário.

Figura 4.1 Tipos de porosidade fechada, não-transpassante e transpassante.

Figura 4.2 Determinação da resistência mecânica à compressão.

Figura 4.3 Corpo-de-prova submetido a ensaio para a determinação da resistência mecânica à compressão, segundo a norma NBR 6224.

Figura 4.4 Determinação do módulo de elasticidade por ultra-som.

Figura 4.5 Curva típica de refratariedade sob carga de um material refratário.

Figura 4.6 Determinação de resistência ao ataque por escória.

Figura 4.7 Determinação da resistência ao choque térmico em materiais refratários.

Figura 4.8 Montagem do revestimento refratário para efeito do cálculo por elementos finitos do perfil térmico da panela com os materiais refratários investigados.

Figura 5.1 Micrografias por MEV das microestruturas dos materiais dolomítico e magnésia-carbono investigados, antes (face fria) e após (face quente) submissão a temperaturas de serviço no revestimento de fornos panela.

Figura 5.2 Refratariedade sob carga para o material refratário dolomítico investigado.

Figura 5.3 Refratariedade sob carga para o materiais refratário MgO-C investigado

Figura 5.4 Variação do módulo de elasticidade em função dos números de ciclos de choque térmico a que os materiais dolomíticos e MgO-C investigados foram submetidos

Figura 5.5 Resistência ao ataque de escória para ensaio em forno de escorificação rotativa

Figura 5.6 Regiões das panelas onde foram medidos os residuais finais e iniciais dos refratários MgO-C e dolomíticos. Os pontos indicados por 1, 2, 3 e 4 são relativos aos pontos utilizados como referência na panela (ver Tabela VI).

Figura 5.7 Perfil térmico apresentado para as panelas construção mecânica, montadas com refratários dolomíticos e MgO-C, para as temperaturas de 1550°C e 1680°C.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Composição química característica de refratários dolomíticos

Tabela 4.1 Composição da escória utilizada para o teste de resistência ao ataque pelos materiais refratários investigados.

Tabela 4.2 Condições de comparação para teste entre os refratários dolomítico e MgO-C.

Tabela 4.3 Materiais utilizados para análise do perfil térmico da panela, em suas respectivas regiões e espessuras.

Tabela 5.1 Composição química dos refratários dolomíticos e MgO-C investigados.

Tabela 5.2 Análise química por microsonda EDS dos pontos analisados via MEV nas faces quentes e frias dos refratários dolomíticos e MgO-C investigados.

Tabela 5.3 Valores de densidade e porosidade aparente dos materiais refratários investigados.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$T$  = temperatura

$r_i$  = raio Interno do revestimento

$L$  = comprimento do lado reto da carcaça (zero para as painelas circulares)

$D_h$  = altura de escória – valor função do comprimento de arco

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

$r$  = raio interno do revestimento da parede lateral

$D$  = distância do *plug* a parede lateral

$LM$  = linha de metal

$LE$  = linha de escória

$\beta$  = fase beta

$\varphi$  = fase psi

$RCT$  = resistência ao choque térmico

$D.M.A.$  = densidade de massa aparente

$m_s$  = massa seca

$m_u$  = massa úmida

$m_i$  = massa imersa

$dL$  = densidade do líquido

$P.A.$  = porosidade aparente

$D.A.$  = densidade aparente

$R_{\text{compressão}}$  = resistência à compressão

$P$  = carga de ruptura

$A$  = área de aplicação da carga

$E$  = módulo de elasticidade

$V$  = velocidade ultrassônica

$\mu$  = coeficiente de poisson

$\rho$  = densidade média aparente

$\varepsilon$  = deformação

$T_0$  = temperatura de estabilização

$T_i$  = temperatura de inicio de deformação

$T_1; T_2; T_{3..n}$  = temperatura onde  $\varepsilon$  é 1, 2,...; n %.

FEA = forno elétrico a arco

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

*MI-1* = medida inicial na ponta da peça correspondente a parte superior do cadinho

*MFE-1* = medida final correspondente à linha de escória

*T.P.* = tempo de patamar

*D.C.M.* = desgaste em contato com o metal.

*MI-2* = medida Inicial de espessura na posição central da peça.

*MI-3* = medida Inicial de espessura da ponta da peça correspondente à parte inferior do cadinho.

E = Modulo de elasticidade

$E_0$  = Modulo de Elasticidade Inicial

RCTE= N° de ciclos que o material resiste antes de atingir o modulo de elasticidade igual a zero.

EDS = Energy Dispersive Sistem

## RESUMO

Os materiais à base de MgO-C e CaO.MgO são utilizados como refratários de trabalho nas panelas da aciaria, por sua excelente refratariedade em condições de serviço. O emprego de materiais de melhor desempenho no revestimento refratário acarreta no aumento da produtividade dos equipamentos e uma redução dos riscos operacionais vinculados aos desgastes localizados em pontos específicos do contato entre o refratário e o aço líquido, e o refratário e escória. Este trabalho realizou um comparativo entre dois diferentes materiais refratários: MgO-C (Grafinox PA LM) e dolomítico (Dolmag 100), ambos fornecidos pela empresa Magnesita Refratários S.A. As características avaliadas foram as propriedades mecânicas e termomecânicas (módulo de elasticidade, resistência mecânica à compressão, refratariedade sob carga e resistência ao choque térmico), físicas (densidade e porosidade aparentes) e químicas (composição química, resistência a escórias e análise microestrutural *post-mortem* por microscopia eletrônica de varredura). Também foi estimado por elementos finitos o perfil térmico de uma panela com revestimentos dos materiais refratários investigados. Os resultados obtidos indicaram o material refratário de MgO carbono como o que reúne melhores propriedades para fazer frente às condições de processo da Aços Especiais Brasil – Unidade Charqueadas, com potencial para melhorar o desempenho e a segurança operacional da aciaria.

## ABSTRACT

Materials based on MgO-C and CaO.MgO are used as refractory in the steelmaking ladles due to its excellent refractoriness. The use of materials with improved performance in the refractory lining leads to an increased productivity and a reduction of operational risks linked to wear located at specific points of contact between the refractory and liquid steel/slag. This study has compared 2 different refractories: MgO-C (Grafinox PA LM) and dolomitic (Dolmag 100), both supplied by the company Magnesita Refratários S.A. The evaluated characteristics were the mechanical and thermal properties (elastic modulus, compressive strength, refractoriness under load and thermal shock resistance), physical (density and porosity) and chemical (chemical composition, resistance to slag and *post-mortem* microstructural analysis by scanning electron microscopy). It was also estimated by finite element methodology the thermal gradient of a ladle using these refractory materials. The results show that the MgO-C refractory can potentially achieve the best results during service at Aços Especiais Brasil - Unidade Charqueadas, improving the performance and operational safety of the melting shop.

# 1. INTRODUÇÃO

A evolução nos últimos anos do consumo mundial de aço per capita teve uma correspondência na produção das indústrias siderúrgicas brasileiras, conforme pode ser visto pelo gráfico da Figura 1.1 (ALAFAR, 2008).



**Figura 1.1: Evolução da produção de aço no Brasil ao longo dos anos.**

Fonte: Steel Statistics Archives 2008 – World Steel Association

Esse significativo aumento dos níveis de produção e a evolução das indústrias siderúrgicas em busca por desempenho superior com custos competitivos nos diversos mercados mundiais levaram ao desenvolvimento de materiais e métodos mais modernos. Isso foi válido também para as aciarias elétricas, na busca por uma maior produtividade, o que veio a exigir um aprimoramento nas características dos materiais refratários, adequando-se a novas práticas industriais.

Assim, os processos de aciaria elétrica sofreram diversas modificações em sua forma, buscando atender às exigências do mercado. Segundo Nakahara (1997), entre essas mudanças, está o aumento de vida útil dos

materiais refratários, a redução dos custos com os materiais aplicados e o aumento da segurança operacional nos processos produtivos.

A exigência em desempenho dos materiais refratários utilizados na siderurgia se torna a cada dia mais elevada. As saídas prematuras dos equipamentos do ciclo produtivo, devido a desgastes em trabalho ou por final de vida útil, dificultam o atingimento das metas estabelecidas e oneram a relação custo por tonelada de aço produzida ou em kg/t, os quais geralmente são os indicadores medidos na produção do aço.

A utilização de materiais que proporcionem segurança e uma relação custo-benefício mais adequada é a chave para o desenvolvimento das empresas. Para tanto, faz-se necessário conhecer as características e propriedades dos tipos de materiais refratários e seu comportamento nas condições de processo, aos quais serão submetidos.

Segundo Coutinho (1996), a seleção de materiais refratários para aplicação como revestimento de fornos painelas vai ser definida a partir da análise de suas propriedades de interesse tecnológico. Entre essas, pode-se citar:

i) Características a frio (temperatura ambiente): acabamento, uniformidade dimensional, resistência mecânica, composição e textura uniformes, formatos e densidades, entre outros.

ii) Características a quente (elevadas temperaturas): refratariedade simples, escoamento, estabilidade volumétrica, expansão térmica reversível, resistência ao choque térmico, resistência mecânica e permeabilidade aos gases.

Os refratários básicos apresentam elevada resistência à corrosão em atmosferas básicas (escórias, poeiras, gases) a altas temperaturas. Dois dos principais tijolos básicos são os produtos magnesianos combinados com carbono e os produtos dolomíticos.

O desenvolvimento de tijolos de MgO-C mais resistentes à corrosão resultou no decréscimo de consumo de tijolos impregnados e tijolos ligados com carbono. O emprego de tijolos de MgO-C continua a crescer de importância na

medida em que novos produtos dessa classe vêm sendo lançados no mercado e novas aplicações vêm sendo encontradas.

A idéia de se adicionar carbono aos refratários magnesianos surgiu em razão do carbono reduzir o efeito da molhabilidade (\*).

(\*) é a capacidade de qualquer superfície sólida ficar molhada, quando em contato com um líquido cuja tensão superficial foi reduzida de modo que o líquido se espalha sobre a superfície do sólido.

Então, uma das principais funções do carbono é prevenir que a escória líquida penetre no refratário e provoque sua ruptura. O carbono previne que os constituintes da escória reajam quimicamente com a ligação de silicato dicálcico que se forma no refratário, preservando sua refratariedade e resistência mecânica a quente. Além disso, com a adição de carbono, há a diminuição de gradientes térmicos no interior do tijolo (pela maior condutividade térmica proporcionada pelo C). Assim, o carbono também previne o fenômeno de esfoliação estrutural, onde a face quente do refratário trinca e cai, devido à penetração da escória em combinação com ciclos de temperatura.

No entanto, é necessária uma elevada estabilidade a altas temperaturas, o que significa uma capacidade do material refratário em resistir a reações internas de oxidação-redução que podem minar sua resistência mecânica a quente e afetar a integridade física do refratário. Isto é obtido através da utilização de anti-oxidantes (elementos como Al e Si) e MgO de alta pureza.

Os refratários dolomíticos são uma mistura de CaO e MgO. Sua alta refratariedade é explicada pelo fato do óxido duplo apresentar temperatura de fusão acima de 2300°C. Além da elevada refratariedade, resistem ao choque térmico e não são atacados pelas escórias básicas. Seu grande inconveniente é não resistirem à umidade, hidratando-se com facilidade. Este problema pode ser corrigido em parte pelo alcatroamento, tanto no processo de fabricação, como depois de prontos.

Refratários dolomíticos oferecem um bom equilíbrio entre baixo custo e boa refratariedade para certos usos, com boas características metalúrgicas para aplicações em aciarias. São basicamente utilizados na indústria

siderúrgica, notoriamente em revestimento das paredes de painéis de usinas de aços especiais.

Nos últimos 20 anos, o uso de dolomíticos aumentou em aplicações que envolvam a produção de aços e nas zonas de queima e de transição de fornos. Especificamente, em relação à produção de aços de elevada qualidade, os refratários dolomíticos apresentam excelente compatibilidade com as escórias básicas, aliados a sua elevada refratariedade.

A boa resistência às escórias, deve-se à presença de CaO livre, não encontrado em outros materiais refratários de menor basicidade. No contato com escórias não saturadas em CaO, uma camada densa de CaO recristalizado e silicato dicálcico se forma na face do tijolo, limitando a posterior penetração de escória.

O emprego tanto do refratário MgO-C como do dolomítico vai depender de vários fatores. Sua seleção para um forno painel deve envolver a avaliação das propriedades de interesse, para saber como esses materiais podem fazer frente às condições de serviço. A partir desta avaliação, é possível conhecer o potencial de desempenho, incluindo aí, as suas limitações na resposta às solicitações advindas das condições de serviço.

Nesse contexto, insere-se o presente trabalho, ao traçar um comparativo de propriedades de interesse tecnológico entre materiais refratários dolomíticos e MgO-C utilizados em fornos painéis. Com a perspectiva de se obter subsídios e indicativos para a seleção de um material refratário com melhor potencial de desempenho, considerando as condições operacionais da aciaria da Aços Especial Brasil – Unidade Charqueadas.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é de realizar um comparativo entre as propriedades físicas, químicas e estruturais, de dois materiais refratários, um dolomítico e outro de MgO-C, com potencial de emprego nas panelas para a produção de aço de construção mecânica da aciaria da Aços Especial Brasil - Unidade Charqueadas. Para isso buscou-se desenvolver os seguintes itens:

- i) caracterização de propriedades químicas e mineralógicas;
- ii) caracterização de propriedades físicas como densidade, porosidade e condutividade térmica;
- iii) caracterização de propriedades mecânicas (resistência à compressão) e termomecânicas (choque térmico e refratariedade sob carga);
- iv) análise microestrutural e controle dimensional, antes e após uso, por microscopia óptica e eletrônica;
- v) levantamento do perfil térmico das panelas por simulação por elementos finitos.
- vi) comparar as propriedades analisadas em laboratório, via simulações e amostragens, com os resultados industriais verificados a partir da análise de espessura residual do refratário em duas regiões da panela:
  - região das fiadas 5 a 10 (revestimento do arranque);
  - região das fiadas 11 a 20 (revestimento da linha de metal).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 METALURGIA DAS PANEIAS NA ACIARIA ELÉTRICA

A crescente exigência do mercado por produtos de melhor qualidade com baixo custo fez com que os processos de produção do aço evoluíssem. Assim, os fabricantes de aço viram-se obrigados a implementar novos processos de controle da composição do aço, utilizando para tanto a panela como recipiente (ARAUJO, 1997).

Segundo International Iron and Steel Institute, as panelas utilizadas em aciaria vêm sofrendo mudanças, no que se refere ao emprego de materiais refratários (Figura 3.1). De uma modesta panela de vazamento superior passou-se a panelas com vazamento inferior. As primeiras panelas vazadas pelo fundo tinham um mecanismo de haste tampão. As atuais panelas têm sistemas de vazamento baseados em válvulas-gavetas, talvez pelo fato de serem agora um vaso-reator, capaz de suportar um novo conjunto de solicitações, os materiais utilizados na panela modificaram-se substancialmente.

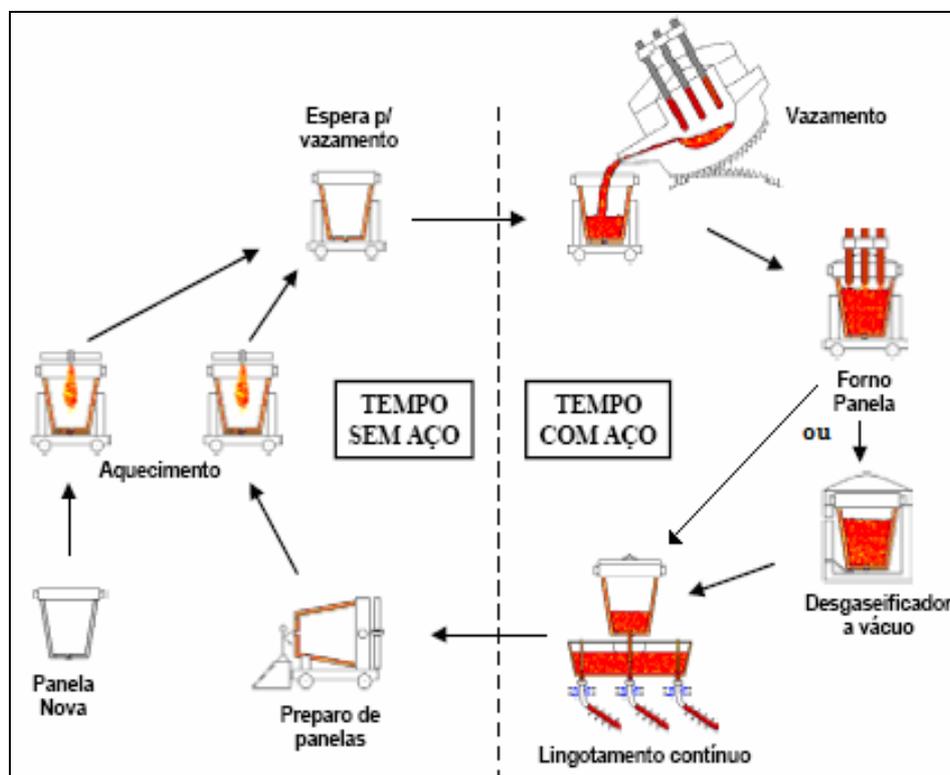


Figura 3.1 – Panela nas etapas de produção do aço, utilizada como reservatório, e no caso do forno panela e desgaseificador como reator (IISI, 2009).

A metalurgia de panela e o processo de desgaseificação a vácuo contribuíram fundamentalmente para o aumento do tempo de residência do aço na panela. Este aumento do tempo obrigou a utilização de materiais refratários de melhor qualidade, traduzido pela melhor estabilidade físico-química e propriedades térmicas.

Acompanhando-se pela Figura 3.1, verifica-se que o ciclo de uma panela na aciaria é composto por duas etapas: uma, em que a panela contém o aço líquido e está no processo e outra, em que se encontra vazia aguardando o vazamento da próxima corrida. Assim, pode-se considerar, de acordo com a U.S. Steel (1985) e Schaefer (1986):

Tempo com aço: inicia no momento que o aço é vazado para a panela e termina quando o aço é totalmente transferido para o distribuidor no lingotamento contínuo. Compreende as seguintes etapas: i) vazamento do aço do FEA; ii) etapas de refino: forno panela, desgaseificação a vácuo e iii) lingotamento contínuo.

Tempo sem aço compreende o intervalo entre o fim do esvaziamento do aço da panela no lingotamento e o próximo vazamento. Formado das seguintes etapas: i) manutenção e manuseio de panelas; ii) aquecimento; iii) espera para vazamento.

Entre as solicitações na panela, pode-se citar: altas temperaturas, escórias corrosivas, grandes tempos de residência e agitação violenta do banho:

i) Altas temperaturas: embora as máximas temperaturas do FEA sejam tipicamente menores, as temperaturas na linha de escória do forno panela são maiores, devido ao reaquecimento por arco elétrico. A corrosão dos refratários pela escória é possível, e encontrando condições favoráveis será diretamente proporcional a fluidez e temperatura da escória. Deve-se ter cuidado com os pontos quentes, principalmente na manutenção da distância entre o eletrodo e parede do refratário, para evitar a ocorrência de desgaste nos pontos quentes.

ii) Escórias corrosivas: escórias contendo potencial de dissolução do material refratário devido a sua composição química (basicidade e fluidez);

iii) Grandes tempos de residência: tempos de refino e reaquecimento são adicionados ao tempo total que o aquecimento é alcançado na panela. Isto resulta em um aumento da temperatura média dos refratários da camada mais interna, logo um aumento da penetração de aço e escória na mesma.

iv) Agitação violenta do banho: a agitação contínua do banho gera um aumento da erosão na região adjacente do plug poroso. A erosão dos refratários da camada mais interna também ocorre.

Além disso, para o refino secundário também foram levadas as operações de dessulfuração e controle de inclusões. Desenvolveram-se ainda técnicas de controle que permitiram o ajuste de temperatura e composição química em faixas muito estreitas, além de proporcionar um encharcamento térmico da panela, reduzindo as perdas de temperatura no lingotamento, obtendo-se a produção de aços mais limpos (OREHOSKI, 1986 e RELLERMEYER, 1986).

Além dos processos citados acima, na metalurgia secundária também foram instalados equipamentos que permitem a eliminação do hidrogênio expondo o aço a pressões reduzidas. Este procedimento é denominado desgaseificação a vácuo (\*).

(\*) Ambiente fechado, livre da presença de O<sub>2</sub>, onde as pressões no interior da campânula são inferiores a pressão externa.

### **3.1.1 PANELA – FORMATO E REVESTIMENTO REFRAATÁRIO**

De acordo com Coutinho (2000), as panelas são geralmente cilíndricas ou em tronco de cone, com a base maior para cima (para facilitar a retirada dos cascões de metal solidificado). Algumas vezes, as panelas são de seção oval, devido ao aumento da capacidade original, mantendo-se o afastamento entre os garfos de gancho da ponte rolante.

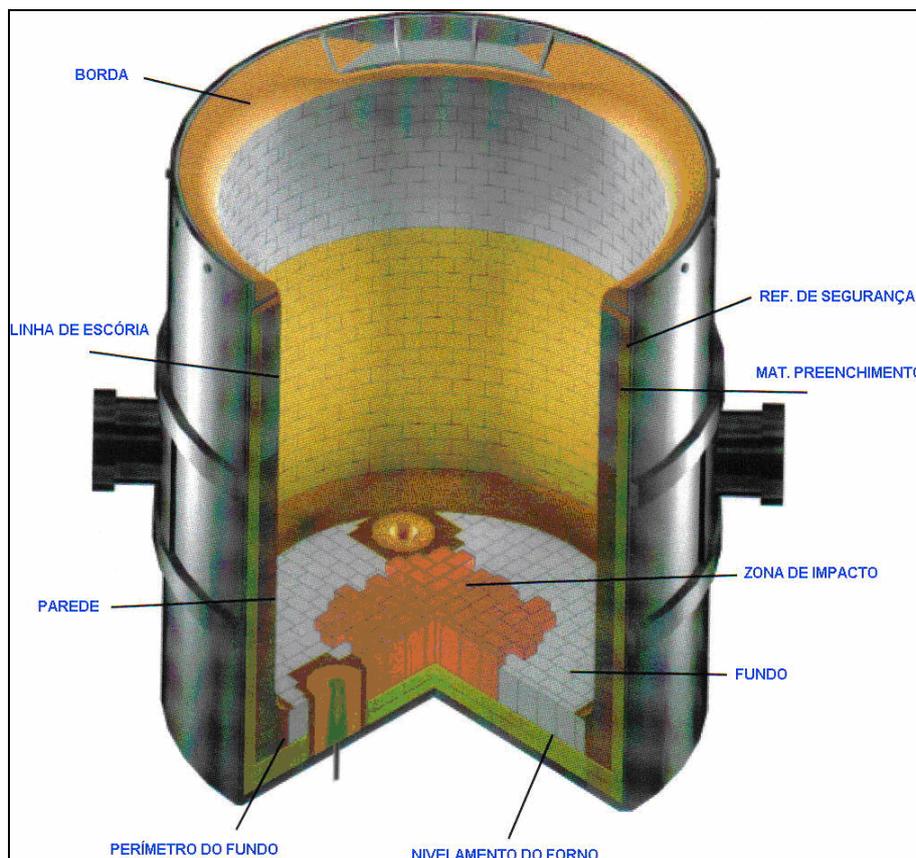
A armação da panela é em chapa grossa, soldada de aço ao carbono. Possui um anel de reforço preso ao fundo para basculamento por meio de gancho e um orifício no fundo por onde irá fluir o aço. Possui, ainda, um reforço para sustentação dos munhões, pelos quais é transportada.

Uma panela de grande capacidade tem a seguinte distribuição de peso:

- i) carcaça 16%;
- ii) refratários 12%;
- iii) aço líquido 70%;
- iv) escória 1%.

Considerações energéticas e de custo baseiam uma diretriz de minimizar o peso da panela em tudo o que se refere à montagem (COUTINHO, 2000 e HANDBOOK OF REFRACTORY PRATICE, 1998). O revestimento refratário das panelas deve resistir às temperaturas elevadas do aço líquido, entre 1580°C e 1700°C, e à erosão mecânica provocada pela turbulência do metal durante o enchimento.

A Figura 3.2 apresenta esquematicamente uma panela em corte, indicando as diferentes regiões do revestimento refratário. A panela compõe-se de uma carcaça metálica cilíndrica, coberta por uma camada de isolante, constituída de tijolos, placas, mantas ou ainda papel isolante.



**Figura 3.2 – Desenho esquemático de uma panela, em corte, indicando as zonas/partes constituintes.** (Fonte: ACI-510 Gerdau Refratários Aplicados a Aciaria Elétrica pág. 10).

O revestimento refratário é constituído de duas partes: o permanente, constituído por material refratário e isolante, formatado ou monolítico, e o de trabalho (ou de desgaste), correspondente à face quente da panela, em contato direto com o aço, constituído de tijolos que irão variar de acordo com o tipo de aço produzido.

Das partes constituintes da panela, podem ser citadas as seguintes características:

- i) Tampa: empregada para minimizar perdas térmicas, sobretudo naqueles casos de tempos prolongados de retenção;
- ii) Borda ou linha superior da parede: encontra-se fora do contato direto com o metal e/ou escória, em alguns casos, pode ser chamada de região de sobrelinha da escória;
- iii) Linha de escória: em contato direto com a escória;
- iv) Paredes: região em contato com o banho de aço líquido;
- v) Zona de impacto: área sobre a qual impacta o aço líquido que é despejado na panela. Esta zona pode estar na parede ou no fundo;
- vi) Fundo com sistema de vazamento (sede de válvula) e de borbulhamento (*plug* poroso).

A escolha dos materiais a serem empregados nestas regiões da panela dependem do processo que será empregado na mesma, bem como o tipo de aço a ser produzido.

Os materiais refratários utilizados nas panelas podem ser dolomíticos, magnésia-carbono ou aluminosos, dependendo do local onde serão aplicados. A montagem segue especificações determinadas para cada área (CASSETE, 2000).

### **3.1.1.1 Revestimento Permanente**

O objetivo principal é realizar o isolamento térmico e proteger a carcaça metálica contra infiltrações de aço. Normalmente são empregados tijolos queimados de alta alumina nas regiões do fundo e linha de metal e na linha de escória são utilizados tijolos MgO carbono.

### **3.1.1.2 Revestimento de Borda Livre (ou *Free-Board*)**

Segundo Frueham (1985), os refratários dessa região estão sujeitos às solicitações de oxidação, temperaturas elevadas, variação de temperatura, ataque (erosão/corrosão) de escórias. Em usinas que possuem elevado *tap-to-tap* no forno panela, utiliza-se os mesmos refratários usados na linha de escória, devido ao ataque do arco elétrico, porém com teores de carbono mais baixos, evitando assim oxidações elevadas nessa região.

### **3.1.1.3 Revestimento de Linha de Escória**

De acordo com Ribeiro e Sampaio (1986), a linha de escória é a região de maior solicitação no forno panela, e é, na maioria dos casos, a região limitante na vida da panela. O principal mecanismo de desgaste é a corrosão química pela ação das escórias, bem como erosão, função de sua agitação, quer seja por agitadores ou via injeção de gases inertes. Porém, existem outros fatores que causam desgaste nessa região:

- i) Temperaturas elevadas;
- ii) Ação da chama do arco elétrico;
- iii) Elevado *tap-to-tap* no forno panela;
- iv) Elevada agitação do banho nas etapas de correção de ligas e dessulfuração;
- v) Variação do volume de escória presente;
- vi) Variação da composição química das escórias (basicidade), teor de MgO, FeO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Com isso, os materiais refratários mais utilizados nessa região são os de MgO-C, pois possuem algumas características importantes para o processo:

- I) Baixa porosidade;
- ii) Elevada refratariedade;
- lii) Elevada resistência mecânica a quente;
- Iv) Elevada resistência à corrosão por escórias;
- v) Boa resistência ao choque térmico;

vi) Adequada resistência à oxidação;

O uso de tijolos dolomíticos para revestimento da linha de escória tem se ampliado. Porém, os desempenhos de uma maneira geral não acompanham a vida útil do restante do revestimento, exceção do forno panela com excelente controle sobre a qualidade das escórias de processo.

#### **3.1.1.4 Revestimento da Linha de Metal**

Segundo Young, Cameron e Schade (1999), na maioria das aciarias predominam os refratários básicos, sendo que a principal característica desses materiais é que o carbono contido não ultrapassa 8%, pois as solicitações da panela nessa região, a erosão do metal líquido, as elevadas temperaturas e o tempo de contato metal/refratário são extremamente desfavoráveis.

Em aciarias que utilizam desoxidação com silício, os refratários dolomíticos são amplamente utilizados devido ao custo e vida útil. Para um bom desempenho na linha de metal e linha de escória, considerando principalmente os revestimentos dolomíticos, recomenda-se a observar os seguintes cuidados operacionais:

i) Pré-aquecimento dos novos revestimentos a uma temperatura mínima de 1000°C, em um tempo mínimo de 12 horas, com isso evita-se possíveis trincas ou lascamentos por choque térmico.

ii) Evitar o uso de O<sub>2</sub> nos aquecedores de modo a preservar o carbono da face quente dos tijolos, evitando infiltrações e perda de resistência mecânica.

iii) Reduzir o número de panelas no ciclo para manter-se o refratário mais quente.

iv) Evitar quedas de temperatura e panelas fora de ciclo, pois com isso evita-se a degradação.

v) Utilizar o *back fill*(\*) o que permite reduzir as infiltrações de aço e escória.

(\*) camada de massa refratária aluminosa, entre o revestimento de trabalho e o permanente.

vi) Otimizar a composição das escórias, evitando que a mesma busque saturação de elementos químicos no refratário.

### **3.1.1.5 Revestimento do Fundo**

Para a região do fundo de panela, pode-se utilizar materiais dolomíticos ou aluminosos (alta alumina). A maior preocupação dessa área do revestimento está na região de impacto do aço durante o vazamento do aço. Com o uso de fornos com bicas excêntricas, as regiões de impacto ficaram bem localizadas no fundo da panela. Para essas áreas, recomenda-se o uso de tijolos do tipo alumina-C (SAVAGE, 1998).

### **3.1.1.6 Sedes de *Plugs* e Válvula**

Como sedes de *plugs* e válvulas, utiliza-se peças pré-moldadas, a partir de concretos de baixo teor de cimento da linha alumina-cromo, alumina-MgO, e alumina-espínélio (SAVAGE, 1998).

## **3.2 DEGRADAÇÃO DOS REFRAATÓRIOS EM PANEAS**

Tanto o Modern Refractory (1992) quanto Routschka (1992) afirmam que quando um revestimento refratário não está atendendo à *performance* esperada, é sempre importante analisar todas as condições operacionais. Essas informações, combinadas com uma investigação *post-mortem* do refratário empregado e com características das escórias e do banho metálico em contato, vão permitir a identificação das solicitações (quanto ao tipo e origem) e dos mecanismos de degradação atuantes.

### **3.2.1 ORIGEM DAS SOLICITAÇÕES**

Duarte (2000) classifica genericamente as solicitações que levam à degradação dos materiais refratários em serviço como térmicas, mecânicas e químicas. Em geral, não existe uma atuação isolada dessas solicitações e sim uma sinergia. Na sua origem, essas solicitações podem estar associadas a fatores operacionais e/ou de projeto e montagem, que são apresentados na seqüência:

#### **3.2.1.1 Fatores Operacionais**

Os fatores operacionais podem ser classificados como:

i) Térmicos: temperatura máxima, alternância de temperatura, fonte de calor e taxa de fornecimento de calor;

ii) Químicos: natureza do processo ataque de escórias, ataque de gases da operação e ou combustível, etc.;

iii) Mecânicos: impacto da carga sólida, erosão por escória e ou metal líquido, entre outros;

iv) Outras fontes: frequência de operação, etc.

A operação do forno panela, que utiliza o arco elétrico como fonte principal de energia para aquecimento das corridas, também apresenta os fenômenos de agressividade à parede refratária pela ação da chama irradiada do arco, como em um forno elétrico.

O princípio de aquecimento do aço pela utilização de energia elétrica está no aquecimento de escória e na transferência de calor da escória para o metal via processo convectivo, ajudado pela agitação do banho promovida pela ação de agitador eletromagnético, ou pela injeção de gases.

O controle operacional, para se evitar o sobreaquecimento das escórias e o desgaste prematuro dos refratários, deve ser feito das seguintes variáveis: i) consumo de energia elétrica; tempo de forno ligado e iii) regulagem da rinsagem ou do agitador eletromagnético. Essas variáveis são a seguir descritas.

#### **-Consumo de energia elétrica:**

Em função da regulagem elétrica adotada, tem-se como resultante um comprimento de arco, que deve ser protegido pela escória para não causar os fenômenos de formação de pontos quentes no revestimento refratário. A quantidade de escória a ser adotada, com o objetivo de proteção do arco pode ser definida de acordo com a Equação 3.1.

$$\text{Peso de escória} = [(\pi r_i^2 + 2 r_i L)] * D_h] * \rho^{\text{escória}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde  $\pi$  é 3,14;  $r_i$  é o raio interno do revestimento;  $L$  é o comprimento do lado reto da carcaça (zero para as painéis circulares);  $D_h$  é o altura de escória menos o valor da função do comprimento de arco e  $\rho^{\text{escória}}$  é a densidade da escória.

#### **-Tempo de forno ligado:**

Quanto maior o tempo de forno ligado, maior será a taxa de aquecimento da escória e, como consequência, a sua agressividade sobre os refratários. A prática das aciarias demonstra um aumento nas taxas de desgaste dos refratários à medida que se aumentam os tempos de forno ligado, ou seja, o consumo de energia elétrica.

#### **-Regulagem da rinsagem ou do agitador eletromagnético:**

Todo o processo de homogeneização química e térmica em um forno panela é obtido através da agitação de banho metálico e escória. Os métodos mais tradicionais e amplamente usados são a rinsagem de gases inertes, via *plugs* ou lanças e agitadores eletromagnéticos. A energia de agitação é expressa em W/t ou W/m<sup>3</sup> e os valores típicos dessa energia em um forno panela são da ordem de 200 a 1000 W/m<sup>3</sup>.

O desgaste de refratários, principalmente da linha de escória, sofre efeito direto dessa energia de agitação. Quanto maior essa energia, maior será a agitação da escória em relação aos refratários, provocando solicitações de erosão e corrosão química mais intensa.

O uso da injeção de gases é mais comum na operação dos fornos panela. Além dos cuidados operacionais de controle de vazão e de pressão da rinsagem, a posição do *plugs* no fundo da panela deve obedecer à Equação 3.2:

$$\frac{1}{2} r < D < \frac{2}{3} r$$

Equação 3.2

onde  $r$  é o raio interno do revestimento da parede lateral e  $D$  a distância do *plug* a parede lateral. A operação com *plugs* muito próximos à parede forma regiões preferências de desgaste ao longo da linha de metal e principalmente na linha de escória da panela.

Rinsagens de baixa vazão podem causar o sobreaquecimento da escória e das camadas superiores do aço, provocando baixas taxas de aquecimento da corrida, aumentando a erosão dos refratários, principalmente da linha de escória. Já altas taxas de rinsagem causam *splash* de aço, formação de curto circuito do arco, *pick up* de carbono, consumo exagerado de eletrodo, e baixa eficiência de aquecimento. Nesses casos, a chama do arco pode ser defletida para as paredes levando a formação de pontos quentes.

Altas vazões – 500 l/min – devem ser empregadas somente nas etapas de adições ou na dessulfuração. Operação com baixas taxas de vazão – 200 a 300 l/min – proporcionarão altas taxas de aquecimento, melhores condições de flotação de inclusões e menores taxas de erosão dos refratários da panela. Além dos efeitos sobre os refratários a energia de agitação exerce função metalúrgica essencial nos processos de desoxidação e dessulfuração.

### **3.2.1.2 Fatores Associados ao Projeto e Montagem**

Savage (1998) subdivide os fatores ligados ao projeto e montagem em:

- i) Tipo de equipamento;
- ii) Volume e geometria do equipamento;
- iii) Projeto e dimensões das paredes, abobadas e arcos;
- iv) Juntas de dilatação;
- v) Isolamento térmico.

O projeto e a montagem do revestimento refratário em painéis para um determinado processo deve seguir os seguintes passos:

i) verificar a adequação do refratário ao processo. Por exemplo, a fluorita ataca todos os tipos de refratários, mas os aluminosos se ressentem mais de teores elevados de fluorita na escória; os dolomíticos são incompatíveis com altos teores de alumina na escória.

ii) adequar o processo ao refratário escolhido. Esta adequação abrange: condicionamento de escória, minimização das perdas térmicas entre corridas, evitar temperaturas elevadas e minimização das paradas de processo.

iii) análise de custo. Nem sempre o melhor refratário é o mais adequado para uma determinada usina, o mais importante é o valor de consumo de refratário em relação ao produto fabricado.

Como para um mesmo processo, as solicitações ao revestimento refratário variam em função da região da panela, é necessária em cada região a utilização do refratário mais adequado, que apresente as propriedades mais compatíveis com as solicitações.

### **3.2.2 TIPOS DE DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS REFROTÁRIOS**

Modern Refractory Practice (1992) e Routschka (1997) avaliam que os principais tipos de degradação a que um material refratário está sujeito em serviço no forno panela são o desgaste, como fenômeno físico; a termoclase, como fenômeno termomecânico e a corrosão, como fenômeno termoquímico.

#### **3.2.2.1 Desgaste**

O desgaste pode ocorrer por três mecanismos diferentes no revestimento refratário de um forno panela, a seguir descritos:

i) Abrasão: sólidos se atritam com o refratário, sejam esses provenientes de materiais pesados, carregados no forno, ou por abrasão por sólidos metálicos ou não-metálicos, ou a projeção direta de pós abrasivos ou gases em altas velocidades;

ii) Erosão: fluidos com partículas em movimento em relação ao refratário. Em geral, associada a processos de corrosão;

iii) Impacto: no impacto a energia cinética é transformada em energia de deformação, quando um corpo choca-se contra uma superfície. É abordado levando-se em conta os conceitos de tensão, deformação e o de energia de deformação dos materiais envolvidos no impacto.

### **3.2.2.2 Termoclase**

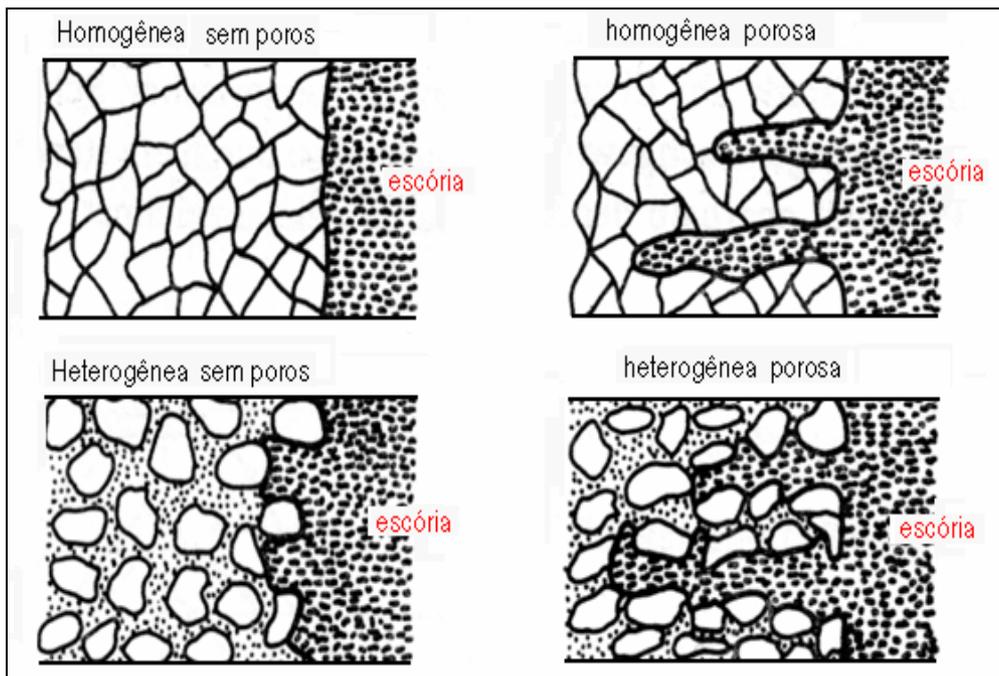
Termoclase é uma degradação por perda de fragmentos das faces dos refratários através de um processo de formação de trincas em sua estrutura, quando submetidos a um gradiente térmico.

O gradiente térmico é o perfil de temperaturas no interior de um refratário desde a face quente até a face fria. Assim sendo, revestimentos mais finos apresentarão menores taxas de desgaste que os mais espessos, pois o gradiente térmico se apresenta mais pronunciado e variações bruscas de temperaturas implicarão em gradientes térmicos não uniformes, o que contribuirá na geração de fortes tensões térmicas caracterizando o fenômeno de choque térmico (OLIVEIRA, 1997).

### **3.2.2.3 Corrosão**

É o conjunto de reações entre um material e seu ambiente, que produz deterioração do material e de suas propriedades.

Para que haja corrosão, é necessário que existam agentes corrosivos. As reações ocorrem entre o refratário, a escória fundida e os agentes fluxantes que tenham sido empregados. A erosão do refratário geralmente acompanha a corrosão por uma movimentação do líquido em contato com o refratário. Assim, para que ocorra a corrosão são necessárias três etapas: contato dos agentes corrosivos, reação na interface com o refratário e remoção dos produtos formados. A Figura 3.3 apresenta quatro diferentes situações a que o material refratário está sujeito em função de sua microestrutura. A influência da tensão superficial entre o refratário e a escória é uma das variáveis mais importantes do processo de corrosão, pois controlam as reações entre o refratário, o líquido e o gás presente no ambiente. No caso de tijolos de MgO-C, o carbono por sua elevada tensão superficial diminui a molhabilidade a metais e a escória líquida, dificultando a penetração no interior do material refratário.



**Figura 3.3: Esquemática do processo de dissolução do refratário pela escória em função da microestrutura.** (Fonte: ACI-510 Gerdau Refratários Aplicados a Aciaria Elétrica).

As escórias exercem sobre os refratários, ações de corrosão, provocando intensas taxas de desgaste, principalmente nas regiões de linha de escória. A composição química das escórias do forno panela depende da qualidade da escória primárias do forno elétrico nos aspectos de basicidade, saturação em MgO e oxidação, e da quantidade de escória que é deixada passar do forno para a panela. O volume de escória passante é uma importante variável e todas as medidas para minimizá-la devem ser tomadas, do contrario adições extras de fundentes deverão ser feitas no forno panela. Como consequência, grandes volumes de escória estarão presentes levando a elevada taxas de desgaste dos refratários, além de maiores consumos de energia, eletrodos e ligas.

Os principais controles para se obter baixas taxas de ataque são:

i) Temperatura *liquidus*: Materiais com uma temperatura liquidus muito elevada, precisam de mais energia para aquecer.

ii) Índice de saturação de escórias em MgO e CaO: Se o material não estiver saturado nesses elementos a escória irá compensar a composição química do refratário da panela

iii) Volume de escória: Corridas com pouca escória, não irão proteger o refratário da ação do arco elétrico.

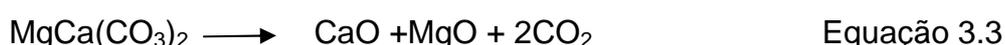
iv) Grau de agitação da corrida: Quanto maior a agitação, maior o desgaste.

v) Tempo de contato escória – refratário: elevadas Tap-to-Tap ao longo do processo aceleram o desgaste

vi) Temperatura de aquecimento das escórias: quanto maior temperatura de aquecimento maior o desgaste.

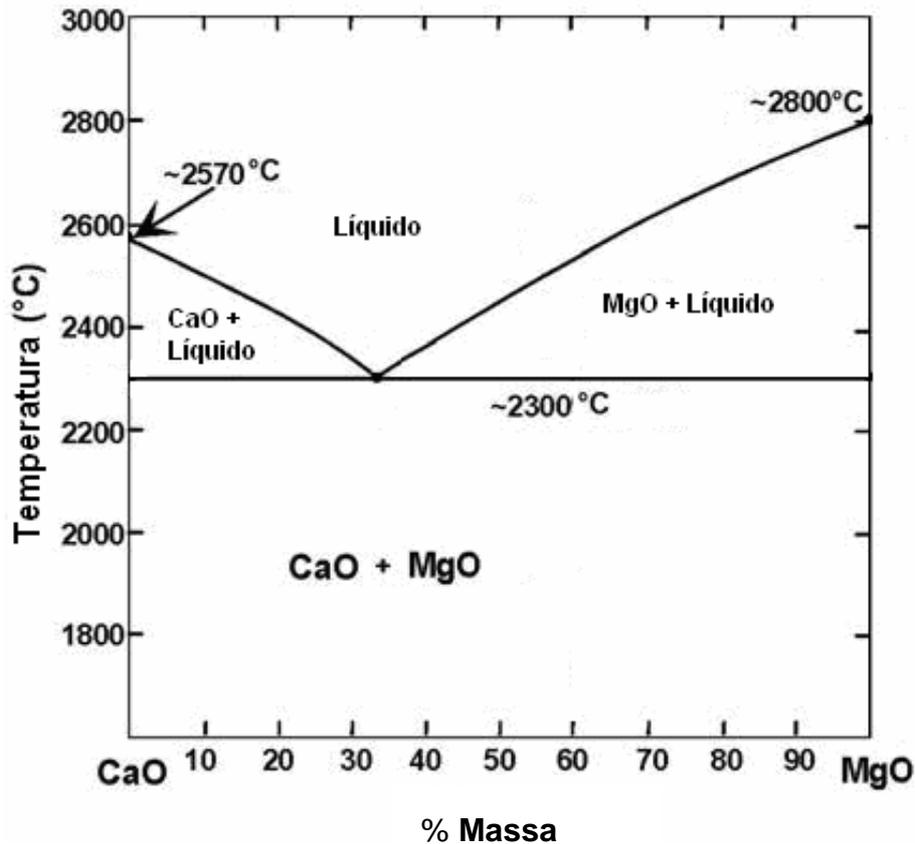
### 3.3 REFRAATÓRIOS DOLOMÍTICOS

Segundo classificação da Refractories Handbook (1998), dolomitas são carbonatos duplos de magnésio e cálcio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) que se decompõem no aquecimento, liberando o dióxido de carbono e originando MgO (~700°C) e CaO (~900°C). O produto da calcinação é simplesmente uma mistura de cal e MgO. São refratários que possuem alta refratariedade. A Tabela 3.1 apresenta a composição química característica e algumas propriedades de refratários dolomíticos. A Figura 3.4 apresenta o diagrama de fases do sistema CaO e MgO. A dolomita existe em abundância, mas nem todos os depósitos são adequados para siderurgia, devido ao nível de impurezas. O processo de obtenção da dolomita consiste em calcinação, moagem e lavagem para retirada das impurezas. A Equação 3.3 descreve a obtenção da dolomita.



**Tabela 3.1: Composição química característica e algumas propriedades de refratários dolomíticos.**

Composição química	(%)
CaO	57
MgO	41
SiO <sub>2</sub>	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80
Fase líquida presente a 1600°C	2-3
Propriedades físicas	
Densidade	3,25 g/cm <sup>3</sup>
Porosidade aberta	4%
Resistência à hidratação (ASTM C-492)	< 5%



**Figura 3.4: Diagrama de fase CaO – MgO que representam os refratários dolomíticos.**

(Fonte: ACI-510 Gerdau Refratários Aplicados a Aciaria Elétrica).

A calcinação deve ser levada a temperaturas muito superiores a 1700°C, o que ocasiona o crescimento dos grãos e reduz a porosidade máxima para 15%, com isso o produto pode ser armazenado por várias semanas.

A partir da dolomita calcinada à morte, os refratários dolomíticos sofrem queima em elevadas temperaturas por longos tempos, dando origem aos refratários dolomíticos sinterizados. Material de custo elevado, mas pode competir com os MgO-C, pois estão menos sujeitos à hidratação do que os dolomíticos não sinterizados.

### 3.3.1 PROPRIEDADES

Os refratários dolomíticos apresentam tendência à deterioração quando estocados, pois a cal livre reage com a umidade do ar. Como antídoto, deve-se transformar a cal livre em um silicato ou ferrita dicálcica (adição de 5 a 7% óxido de ferro).

Os refratários dolomíticos apresentam também a tendência da transformação do silicato dicálcico- $\beta$ , que se forma a altas temperaturas, para a

forma  $-\phi$ , o que ocasiona uma redução de volume de 10%. Esta reação, denominada *dusting*, pode desintegrar um tijolo denso, deixando-o na granulometria similar a de um pó de arroz. A adição de ácido bórico ou fosfatos tendem a impedir a essa transformação de fase.

A adição de carbono tem a capacidade de inibir a penetração profunda de escórias, devido a uma combinação de vários fatores como, por exemplo, o bloqueio físico dos poros e diminuição da molhabilidade (Figura 3.5), além de o carbono reagir com escórias ferrosas, reduzindo o  $Fe_2O_3$  presente a FeO ou a ferro metálico, que não são corrosivos para a MgO e para a cal. A impregnação com alcatrão também melhora a resistência à hidratação, e a resistência ao *spalling* e a escórias.

Os refratários dolomíticos possuem boa resistência a escórias devido à cal livre que está presente em sua composição. Em contato com escórias pouco saturadas em cal, uma densa camada de recristalizado de silicato dicálcico forma-se na face quente do tijolo, limitando posterior penetração de escória e retardando o desgaste. Contudo, escórias deficientes em cal e ricas em óxidos  $R_2O_3$  podem ser bastante agressivas. Isto se deve à formação de aluminatos de cálcio e/ou ferritas com ponto de fusão abaixo de  $1600^{\circ}C$ .

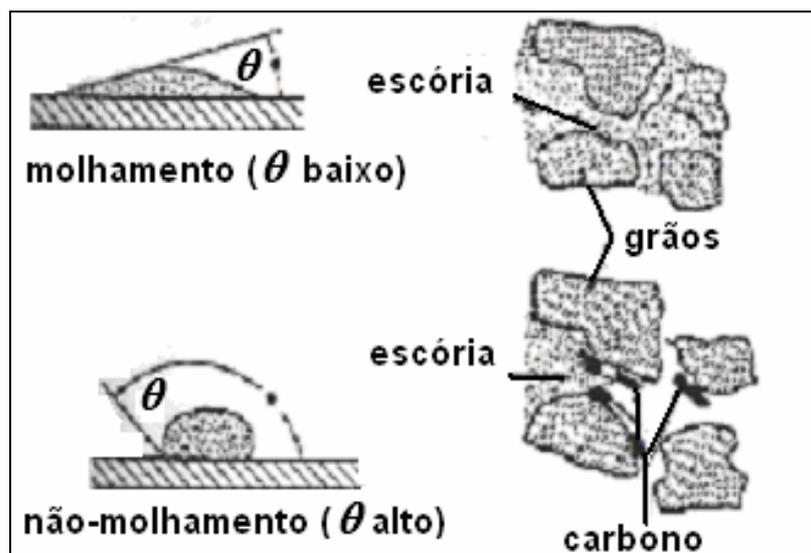


Figura 3.5: Molhamento dos refratários com e sem C em sua composição química.

(Fonte: ACI-510 Gerdau Refratários Aplicados a Aciaria Elétrica).

De maneira geral, as propriedades dos refratários dolomíticos podem ser subdivididas a partir do processo de fabricação a que foram submetidos. Os materiais refratários dolomíticos sinterizados a altas temperaturas apresentam:

- i) Elevada resistência à compressão;
- ii) Estabilidade dimensional;
- iii) Boa refratariedade;

Os materiais refratários apenas queimados apresentam:

- i) Baixa resistência à compressão;
- ii) Elevada sensibilidade a óxidos de ferro;

### **3.4 Refratários MgO-C**

Pela definição do Refractories Handbook (1998), os refratários magnesianos são materiais refratários à base de MgO que possui alto ponto de fusão (superior a 2800°C). Apresentam excelente resistência ao ataque de óxidos de ferro, alcalinos e fundentes ricos em cal. Porém, a sua principal limitação é a expansão térmica elevada, que torna difícil produzir tijolos com elevada resistência ao choque térmico. Possuem elevada condutividade térmica e elevado calor específico, o que demanda muita energia para aquecimento.

A matéria-prima é a magnesita ( $MgCO_3$ ) que é calcinada a elevadas temperaturas. Quanto menor o teor de  $SiO_2$ , melhor sua qualidade. Os processos de fabricação podem levar a diferentes produtos, classificados como:

i) Tipo A: com pega cerâmica (sinterização), obtida a partir de queima entre 1500°C e 1650°C;

ii) Tipo B: com pega cerâmica (sinterização), obtida a partir de queima a temperaturas de 1700 a 1800°C;

iii) Tipo C: são quimicamente ligados, pela adição de solução de sulfato de magnésio ou outras resinas e grafita. O tijolo é fornecido como não-queimado;

iv) Tipo D: impregnados com piche (em desuso).

### 3.3.1 PROPRIEDADES

Os materiais refratários que apresentam grãos de periclásio, de 500 a 1000  $\mu\text{m}$ , fundidos por eletrofundição das matérias-primas, possuem maior resistência à erosão e à perda de massa que os materiais refratários com grãos sinterizados.

Os grãos eletrofundidos são também mais resistentes à escória. Isso ocorre devido à menor porosidade intragranular. A Figura 3.6 apresenta um comparativo entre as microestruturas de materiais refratários com grãos eletrofundidos e com grãos sinterizados. A maior resistência do grão eletrofundido é especialmente importante na presença de carbono, pois acima de 1650°C o MgO tende a ser reduzido, segundo a Equação 3.4:



Os materiais refratários de MgO possuem alta capacidade de acomodar os óxidos de ferro em soluções sólidas a temperaturas elevadas, sem formação de fase líquida (1713°C, ao ar, diagrama B da Figura 3.7). O MgO pode conter até 68% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  antes de formar líquido. A resistência da microestrutura às escórias vai depender do balanço entre as impurezas intra e intercrystalinas, as quais irão determinar a resistência do grão ou da matriz (Figura 3.8).

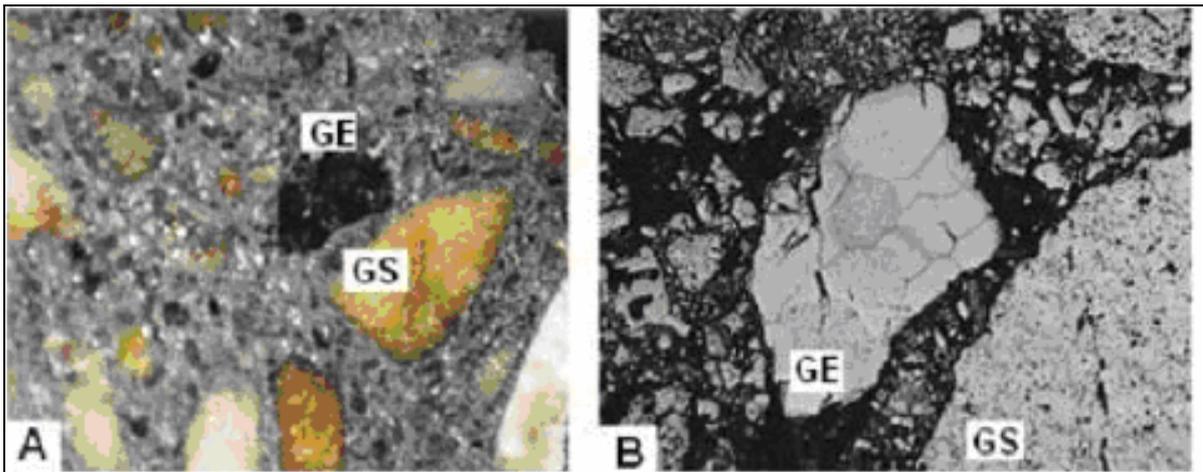


Figura 3.6: Comparação entre estruturas com GE (Grão Eletrofundido) e GS (Grão Sinterizado). Aumento da lupa em (A) 20x e (B) em 50x. ( Fonte: Materiais refratários Básicos pág.35)

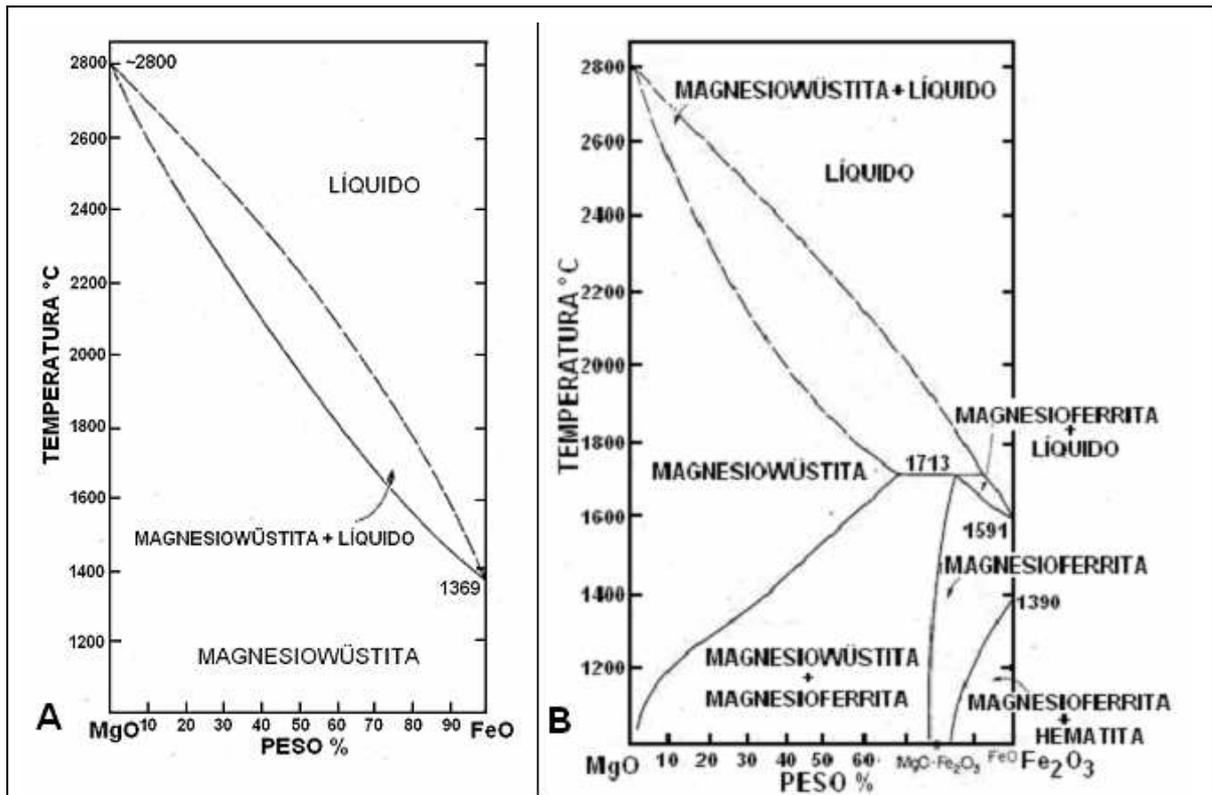


Figura 3.7: Diagramas de fase do sistema MgO-óxido de ferro. (A) em contato com ferro metálico e (B) em contato com o ar. (Fonte: Materiais Refratários Básicos)

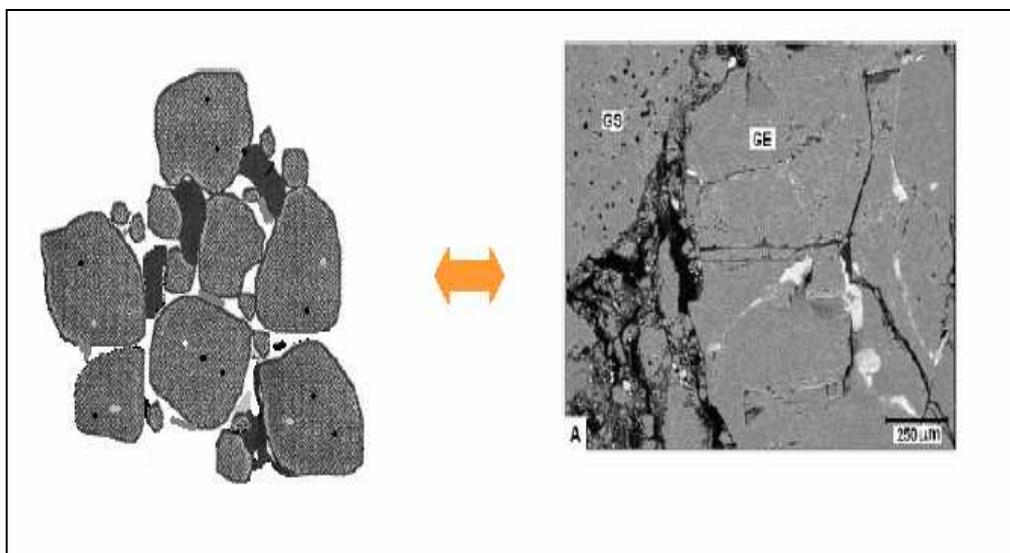


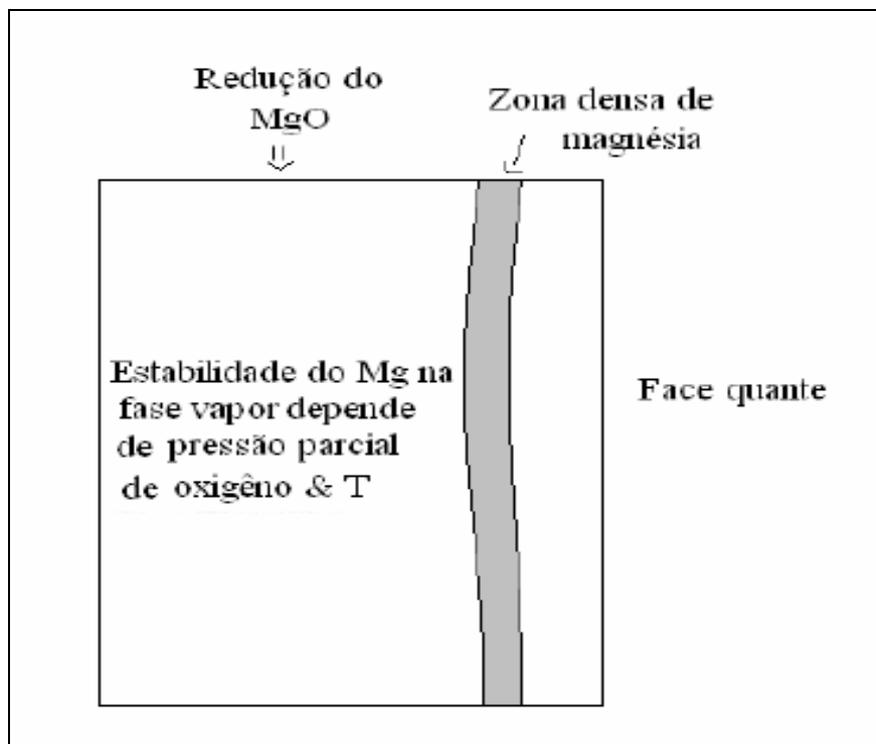
Figura 3.8: Grãos com e sem impurezas na matriz. (Fonte: Materiais Refratários Básicos)

A adição de carbono ao refratário de MgO promove um aumento da condutividade térmica, por consequência maior resistência ao choque térmico. Também aumenta a resistência à penetração de escórias e, em certos casos, a resistência mecânica a quente e a refratariedade.

A presença do carbono modifica a microestrutura, em especial, a distribuição do silicato líquido relativamente à fase de periclásio, por fazer aumentar o ângulo de contato entre a escória e o material refratário. Este aumento não é devido à baixa pressão de  $O_2$ , gerada pela pressão do carbono, mas antes à alteração da energia de superfície dos grãos de MgO onde o carbono penetra por difusão.

Outro efeito da presença de C é a formação da chamada “zona densa de MgO”(\*), imediatamente atrás da face quente do refratário magnésítico que contenha carbono, fenômeno ilustrado na Figura 3.9.

(\*) Entre o ponto de redução do MgO em contato com o carbono e a vaporização do metal na face quente, existe um combinação de potencial de oxigênio e temperatura, para a qual o Mg não é estável na forma de vapor. Como a pressão de  $O_2$  é mais alta na face quente ( $\sim 10^{-8}$  atm), o Mg oxida e condensa a partir da fase vapor, formando uma camada densa de MgO secundária. Teoricamente, a camada densa protege o refratário contra a oxidação do carbono e dificulta a infiltração de escória no refratário.



**Figura 3.9: Formação da zona densa de MgO no tijolo refratário.**

(Fonte: Materiais Refratários Básicos).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais refratários investigados neste trabalho foram:

i) Dolmag-100. Fornecidos pela empresa Magnesita Refratários S.A. É um tijolo refratário à base de dolomita sinterizada, quimicamente ligada a piche e impregnado. Com composição química à base de CaO (50 – 54%) e MgO (43 – 47%). É empregado na montagem das linhas de metal e escória das painéis.

ii) Grafinox PA LM, Fornecidos pela empresa Magnesita Refratários S.A. É um tijolo refratário de MgO-C, quimicamente ligado, à base de MgO sinterizado e /ou eletrofundido, com adições de antioxidantes. Com composição química constituída por MgO (90 – 95%), C (5 – 8%) e outros (máx. 4,8%). É empregado na montagem das linhas de metal das painéis.

### 4.2 MÉTODOS

#### 4.2.1 DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE

A densidade aparente é uma medida da relação entre a massa e o volume de um refratário. O método utilizado para determinação da densidade foi o da balança hidrostática e geométrica (norma NBR 6220). A Equação 4.1 calcula o valor da densidade de massa aparente (*D.M.A.*).

$$D.M.A. = m_s [(m_u - m_i) / dL] \quad \text{Equação 4.1}$$

onde:

$m_s$  = massa seca;

$m_u$  = massa úmida;

$m_i$  = massa imersa;

$dL$  = densidade do líquido.

A Figura 4.1 ilustra os tipos de porosidades possíveis em um material refratário. A porosidade aparente, muitas vezes referida como aberta, é uma

medida da proporção de poros abertos (ou transpassantes ou interconectados) presentes em um material.

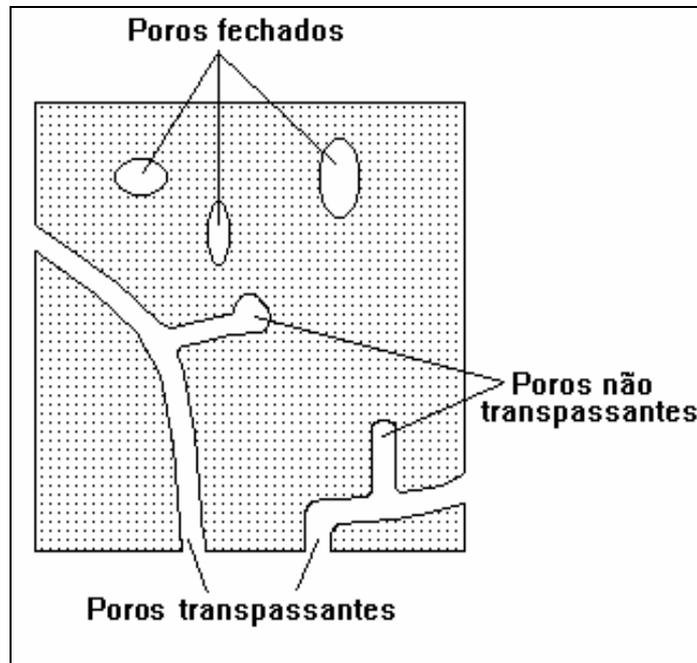


Figura 4.2. Tipos de porosidade fechada, não-transpassante e transpassante. (Fonte: Refratários para Siderurgia- Aciaria Elétrica- ABM).

Segundo a NBR 6220, a porosidade ou porosidade aparente é uma relação entre os poros abertos ou interconectados, permeáveis aos fluidos, e o volume do material. O método utilizado para determinação da porosidade foi o da balança hidrostática e porosimetria de mercúrio (\*), realizado na empresa magnesita, segundo a Equação 4.2.

(\*) o mercúrio é colocado sobre a superfície da amostra, e é exercida uma força externa que supere a tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contato entre o mercúrio e material.

$$P.A. = [(m_u - m_s) / (m_u - m_i)] * 100 \quad \text{Equação 4.2}$$

O método de saturação utilizado para a determinação da densidade e porosidade, foi o de banho-maria e colocação em vácuo de água ou querosene.

Para esse ensaio o foi preparado um corpo-de-prova cilíndrico com dimensional de 100x200mm<sup>2</sup>.

Foi utilizada uma balança semi-analítica com resolução de 0,1g ou 0,01g. Para materiais carbonáceos, a secagem em estufa foi feita a  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , e para materiais não-carbonáceos a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . O corpo de prova foi lmerso em um recipiente com querosene como líquido saturante toda a vez que foi analisado um material que reaja com água ou contenha produtos nela solúveis e submetê-lo a vácuo num período de 2h, em uma câmara de vácuo com pressão absoluta inferior a 6,66 KPa.

#### 4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A TEMPERATURA AMBIENTE

A resistência mecânica à compressão ( $R_{compressão}$ ) foi avaliada segundo a norma NBR 6224, de acordo com a Equação 4.3.

$$R_{compressão} = P/A \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde:  $P$ = carga de ruptura (N)

$A$ = área de aplicação da carga ( $\text{mm}^2$ )

Os corpos-de-prova foram preparados com dimensões de  $50 \pm 5$  mm de altura e diâmetro, e secos em estufa a  $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . A máquina de ensaios universal utilizada permitiu a medida das cargas aplicadas, com precisão de  $\pm 2\%$ . O aumento de carga aplicada foi de  $1 \pm 0,1$  MPa/s.

A Figura 4.2 ilustra esquematicamente o ensaio realizado. A Figura 4.3 apresenta fotografias de um corpo-de-prova antes e após a determinação de sua resistência mecânica à compressão.

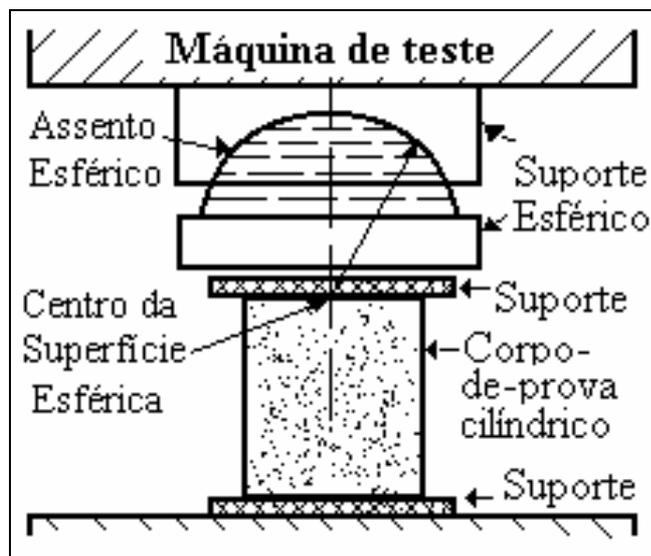


Figura 4.2. Determinação da resistência mecânica à compressão.

(Fonte: Magnesita, Ensaios Físicos e Propriedades Mecânicas dos Refratários)



**Figura 4.3. Corpo-de-prova submetido a ensaio para a determinação da resistência mecânica à compressão, segundo a norma NBR 6224.**

(Fonte: Magnesita, Ensaios Físicos e Propriedades Mecânicas dos Refratários)

#### 4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade foi calculado a partir da determinação da velocidade do som nos materiais refratários investigados, com base na norma NBR 14641, de acordo com a Equação 4.4. A Figura 4.4 apresenta esquematicamente a metodologia adotada.

$$E = V^2 \cdot \rho \cdot [(1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu)] \quad \text{Equação 4.4}$$

onde:

$E$  = módulo de elasticidade;

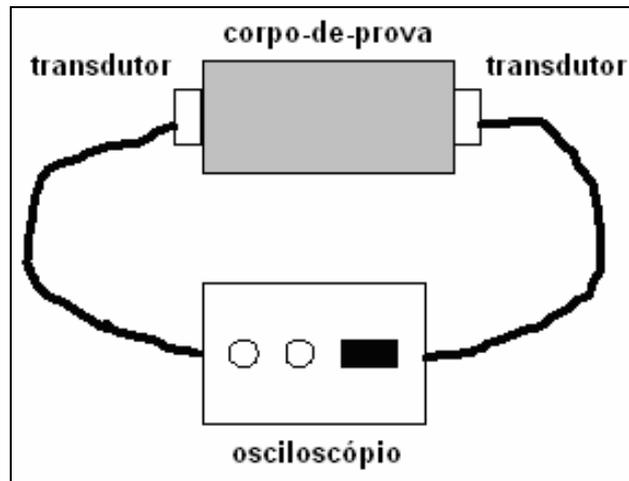
$V$  = velocidade ultrassônica;

$\mu$  = coeficiente de Poisson;

$\rho$  = densidade média aparente;

Para a determinação da velocidade ultrassônica, foi utilizado um equipamento de ultrassom da James Instruments – Modelo C-4902 “V” Meter de 150 kHz. Previamente à medição, os corpos-de-prova foram secos em estufa a  $110^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ . As superfícies dos corpos-de-prova foram umectadas com graxa para melhor contato com os transdutores. Foi tomado o tempo de

transmissão do pulso ultra-sônico em pelo menos três pontos ao longo da peça, com espaços entre si de no mínimo 200 mm.



**Figura 4.4. Determinação do módulo de elasticidade por ultra-som** (Fonte: Refratários para Siderurgia- Aciaria Elétrica- ABM).

#### 4.2.4 TESTE DE REFRATARIEDADE SOB CARGA

O teste de refratariedade sob carga é feito com uma taxa constante de aquecimento, onde se avaliam as temperaturas correspondentes a determinadas deformações pré-determinadas da amostra (Figura 4.5). São testes que geram informações importantes para solicitações sob carga em altas temperaturas, com base na norma NBR-6223.

Este ensaio fornece as temperaturas  $T_{0,5}$ ,  $T_1$ ,  $T_2; \dots; T_n$  nas quais a deformação  $\varepsilon$  é de 0,5%, 1%, 2%, e assim por diante, a partir da dilatação térmica máxima do corpo-de-prova que ocorre na temperatura  $T_0$ .

Para a realização deste ensaio, utilizou-se corpos-de-prova dos materiais em estudo, com dimensões de 110 mm de diâmetro x 250mm de altura e 50mm de diâmetro x 600mm de altura e discos de MgO-C e CaO.MgO, com 50mm de diâmetro e 5mm de altura, numa mistura de coque médio e grafita (10:1).

As medições foram realizadas em um forno elétrico, dotado de um sistema que permite aplicação de carga vertical constante de 2kgf/cm<sup>2</sup>, com zona de queima cilíndrica e capacidade de até 1800°C. As leituras de temperatura e do micrômetro foram realizadas a cada 10 minutos e/ou quando ocorreria um ponto típico.

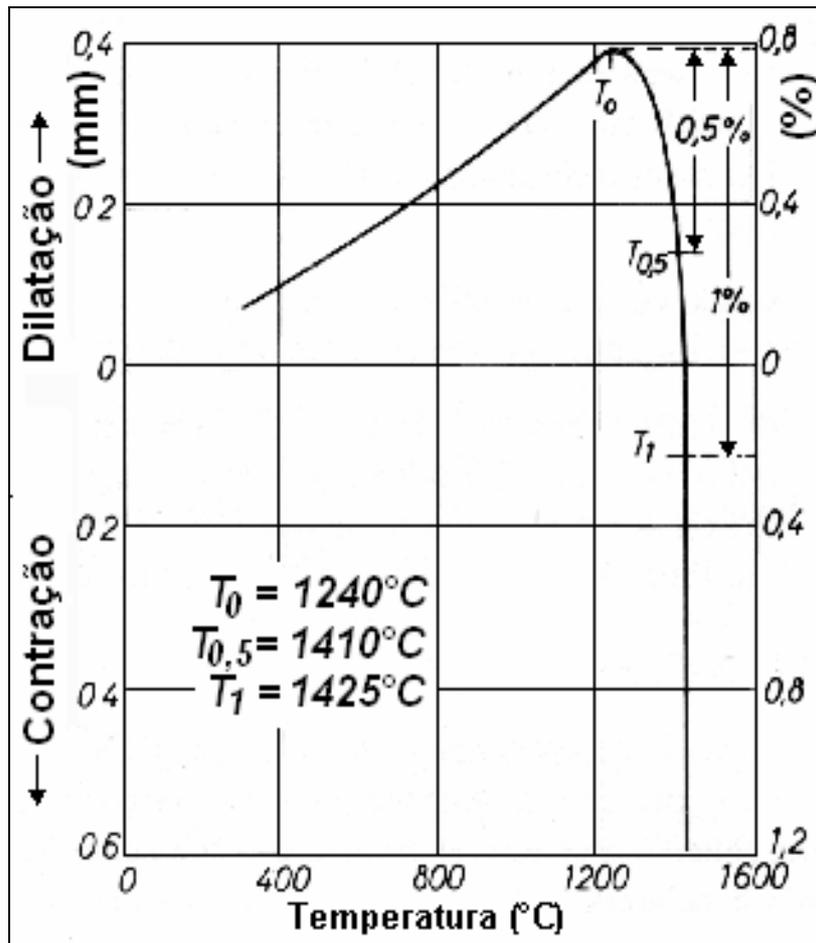


Figura 4.5. Curva típica de refratariedade sob carga de um material refratário (Fonte: Refratários para Siderurgia- Aciaria Elétrica- ABM).

#### 4.2.5 RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE ESCÓRIA

A resistência ao ataque de escórias dos materiais refratários investigados foi determinada pelo ensaio estático (Figura 4.6).

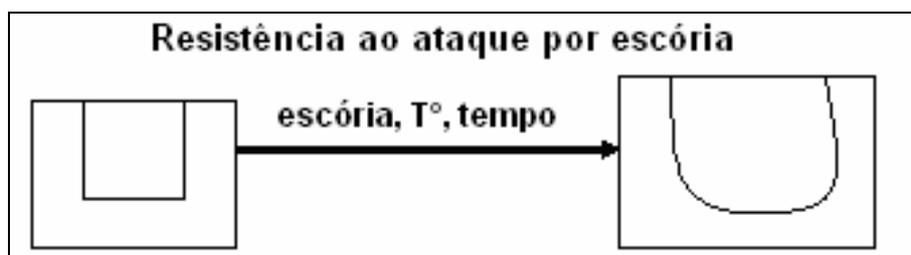


Figura 4.6. Determinação de resistência ao ataque por escória (Fonte: Refratários para Siderurgia- Aciaria Elétrica- ABM 2000).

Para tanto, foi utilizado um forno de indução de 50KW que permitia a fusão de uma carga de escória em tempos de 60 a 90 minutos. O nível do banho no cadinho contendo a escória foi mantido a  $\frac{3}{4}$  da altura do cadinho. A Tabela 4.1 apresenta a composição da escória utilizada no teste de resistência ao ataque pelos materiais refratários investigados.

As coquilhas eram previamente pintadas com tinta grafitada dissolvida em água. Os corpos-de-prova foram avaliados após a 2ª ou 3ª adição de escória. Para tanto, a escória era retirada do cadinho, basculando o forno lentamente até que aparecesse a linha de escória.

Após ataque, os corpos-de-prova foram cortados ao meio no sentido longitudinal. Foram tomadas as seguintes medidas com paquímetro digital:

a) duas medidas na linha de escória, uma em cada metade, na sua parte mais desgastada, identificando como *MFE-1* e *MFE-2*;

b) duas medidas da linha de metal em cada metade da peça, determinada nos cadinhos com altura de 160 mm, a 15mm da parte inferior do cadinho e a 35 mm acima da primeira medida. Quando a medida de 35mm coincidia com a linha de escória, a segunda medida era tomada a 25mm acima da primeira medida. Nos cadinhos com altura de 229 mm, a primeira medida foi tomada a 15 mm da parte inferior do cadinho e a segunda medida a 100 mm acima. Essas medidas foram identificadas como *MFM-1*, *MFM-2*, *MFM-3* e *MFM-4*.

**Tabela 4.1. Composição da escória utilizada para o teste de resistência ao ataque pelos materiais refratários investigados.**

<b>Material</b>	<b>% em peso</b>
Alumina calcinada S-3-G	12
Areia de sílica < 45 µm	18
Cal hidratada	55
Sinter M-10 < 45 µm	15
Total	100

O desgaste na linha de escória (*D.L.E.*) foi calculado a partir da Equação 4.5.

$$D.L.E. = \frac{(MI-1 - MFE-1)}{TP} \text{ (mm/h)} \quad \text{Equação 4.5}$$

onde:

*MI-1*= medida Inicial na ponta da peça correspondente a parte superior do cadinho (mm)

*MFE-1*= medida final correspondente à linha de escória (mm)

*TP*= tempo de patamar (h)

O desgaste na linha de contato com o metal (*D.C.M.*) foi calculado a partir da Equação 4.6.

$$D.C.M. = \frac{(MI-2 + MI-3)/2 - (MFM-1 + MFM-2 + MFM-3 + MFM-4) / 4}{(MI-2 + MI-3)/2} \times 100 \quad \text{Equação 4.6}$$

onde:

*MI-2*= Medida Inicial de espessura na posição central da peça;

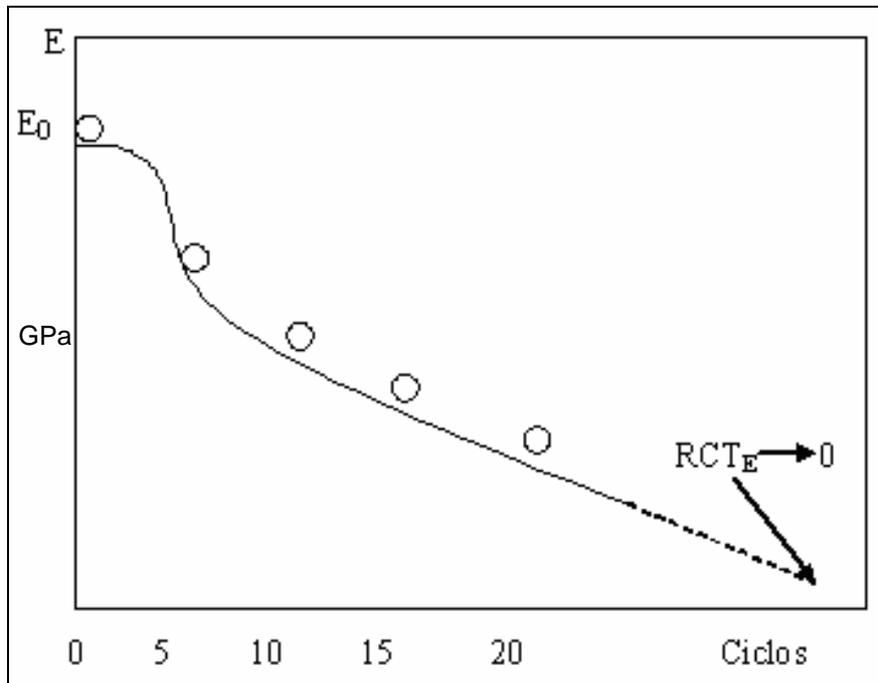
*MI-3*= Medida Inicial de espessura da ponta da peça correspondente à parte inferior do cadinho.

#### 4.2.6 RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO E TERMOCLASE

Para a avaliação da resistência ao choque térmico dos materiais refratários investigados, foi empregada uma metodologia desenvolvida pela empresa Magnesita Refratários S/A, baseada na avaliação do módulo de elasticidade residual da amostra após 5, 10, 15 e 20 ciclos de choque térmico entre as temperaturas de 1200°C e a temperatura ambiente, medido por ultra-som (item 2.2.3). A extrapolação da reta traçada entre os pontos para o valor de módulo de elasticidade residual igual a zero ( $RCT_E$ ), permite estimar o número de ciclos de choque térmico necessários para se ter *E* igual a zero (Figura 4.7).

O módulo de elasticidade dos corpos-de-prova (medindo 160 x 40 x 40 mm<sup>3</sup>) foi avaliado por ultra-som antes de serem submetidos a choque térmicos (valor *ME*). A variação brusca de temperatura impingida aos corpos-de-prova (dois grupos de 5) consistia em aquecê-los em forno elétrico tipo mufla e mantê-

los em patamar por 30 min. Em seguida, são retirados sequencialmente e colocados sobre uma bandeja metálica, onde são resfriados por 30 min sob fluxo de água. Um novo ciclo se inicia, quando os corpos-de-prova eram colocados novamente para aquecimento no forno elétrico.



**Figura 4.7: Determinação da resistência ao choque térmico em materiais refratários.** (Fonte: Refratários para Siderurgia- Aciaria Elétrica- ABM 2000.pág.75)

Após o 5º, 10º, 15º e 20º ciclos, findos os 30 min de resfriamento sobre a bandeja, os corpos-de-prova eram esfriados forçadamente com o auxílio de um ventilador até que a temperatura atingisse aproximadamente 40°C (temperatura de manuseio). Então, eram realizadas leituras de ultra-som em todos os corpos-de-prova em teste.

Os corpos-de-prova dos materiais refratários MgO-C tiveram suas faces (com exceção da face retificada de 160 x 40 mm<sup>2</sup>) recobertas com silicato de sódio líquido, até que formasse uma camada protetora vítrea em sua superfície (aproximadamente duas demãos).

#### 4.2.7 MICROSCÓPICO ELETRÔNICO DE VARREDURA

A microestrutura dos materiais refratários foi investigada por microscopia eletrônica de varredura. Para tanto, utilizou-se um equipamento da marca Jeol, modelo JSM-5410, equipado com microssonda EDS.

As superfícies de interesse das amostras foram recobertas com grafita por *sputtering*. A amostra foi embutida em uma resina e polida com acabamento espelhado, especialmente para a obtenção de imagens por elétrons retro espalhados (*backscattered*) e microanálises por raios X.

#### 4.2.8 ANÁLISE DE ESPESSURAS RESIDUAIS

O desgaste dos revestimentos refratários das placas foi avaliado pela medida do residual da linha de metal, após saída de operação na fabricação de aço de construção mecânica. A montagem do revestimento MgO-C e dolomítico foram semelhantes da 33ª a 30ª (tijolos F3-10X) e da 29ª a 21ª (tijolos PA-AEP) diferindo da 20ª a 5ª fiada: no caso do revestimento MgO-C, foi utilizado o tijolo PA LM e no caso do revestimento dolomítico, o tijolo DOLMAG-100. A espessura foi medida fiada a fiada em relação à medida inicial demonstrada na figura 4.8, para se obter o residual final de cada placa.

A Tabela 4.2 apresenta as condições de operação das placas, comparando o número de vezes em que a placa saiu para troca e retornou para operação (nº de corridas) e o número de corridas em cada ciclo sem troca do revestimento refratário (MD corridas por placa).

**Tabela 4.2. Condições de comparação para teste entre os refratários dolomítico e MgO-C.**

	Nº campanhas (*)	Nº corridas da placa (**)
MgO-C	13	57
Dolomítico	58	42

(\*) Número de vezes em que a placa saiu para troca do refratário o retornou para operação.

(\*\*) Nº de corridas em cada ciclo do refratário da placa, sem troca do refratário.

#### 4.2.9 PERFIL TÉRMICO DAS PANELAS

O perfil térmico das painelas foi avaliado com o auxílio do programa ANSYS 10.0 WORKBENCH, através do método de elementos finitos, para 4 configurações: projetos de montagem do revestimento refratário, operando a 2 temperaturas distintas de referência do aço líquido: 1550 e 1680°C. A temperatura externa à painela foi considerada 20°C. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros utilizados na estimativa do perfil térmico por elementos finitos da painela para a fabricação de aço construção mecânica, a partir dos materiais utilizados na montagem e suas respectivas espessuras.

A Figura 4.8 apresenta a montagem do revestimento refratário para efeito do cálculo por elementos finitos do perfil térmico da painela com os materiais refratários investigados.

**Tabela 4.3. Materiais utilizados para análise do perfil térmico da painela, em suas respectivas regiões e espessuras.**

<b>Região</b>	<b>Dolomítico</b>	<b>MgO-C</b>	<b>Espessura Inicial dos Tijolos (mm)</b>
Isolante Parede	Papel fibra Cerâmica	Isomag 70/ Duraplac	10
	Sial - 45	Sial - 45	25
Permanente: LM/Free Board	Alukor 70 CP	Alukor 70 CP	76
Permanente: LE	Grafimag 10 T GX	Grafinox 2006/02	76
Back-Fill	Basimix – BFP	Basimix - BFP	10
<b>Trabalho LM</b>	<b>Dolmag 100</b>	<b>Grafinox PA LM</b>	<b>127</b>
LE	Magnox PA AEP	Magnox PA AEP	127

OBS.: LM= Linha de Metal LE= linha da Escória

Região grifada em azul (LM) foi a região de estudo do trabalho.

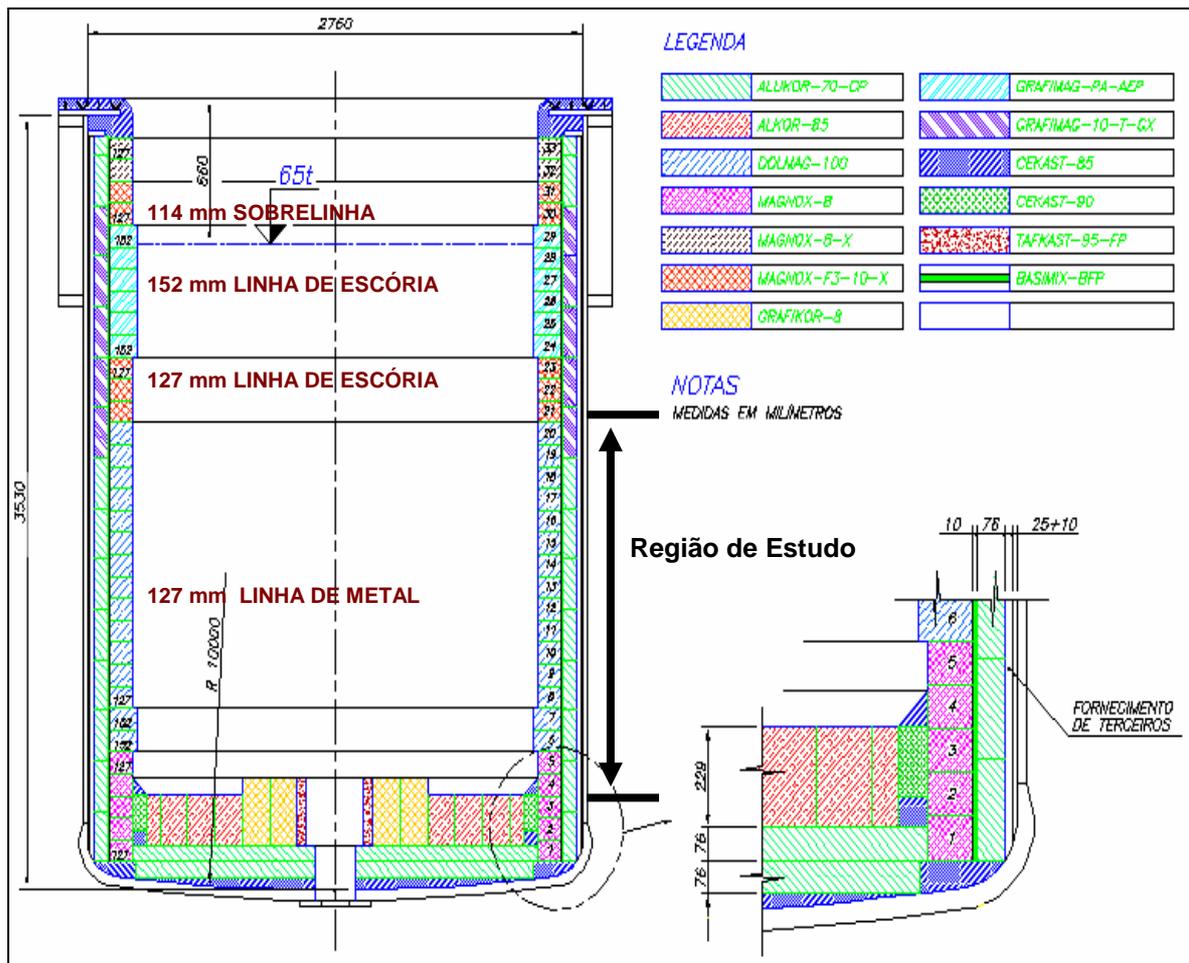


Figura 4.8. Montagem do revestimento refratário para efeito do cálculo por elementos finitos do perfil térmico da panela com os materiais refratários investigados. (Fonte: Desenho Técnico fornecido pela empresa Magnesita Refratários S.A.).

A região destacada no rodapé da panela refere-se às fiadas iniciais, onde tem-se um desgaste acentuado, o qual tornou-se alvo desse estudo. Esse desgaste deve-se a transição entre diferentes materiais refratários e acúmulo de escória no local, após o ciclo com aço da panela.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados e discutidos comparativamente os resultados da caracterização química, microestrutural, física e (termo)mecânica, bem como resistência a escória, residual após campanha e perfil térmico dos materiais refratários dolomíticos e os MgO-C investigados.

### 5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURA

#### 5.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 5.1 apresenta a composição química dos materiais refratários dolomítico e MgO-C investigados. O percentual de C, mais elevado dos refratários MgO-C, possibilita uma maior resistência à penetração de escória. Outro ponto a ser observado está relacionado ao percentual de MgO e sua implicação na não-saturação da escória ou de escória com basicidade baixa, o que irá influenciar na suscetibilidade ao desgaste na linha de escória.

De outra forma, valores mais elevados para  $Al_2O_3$  e MgO, se não considerados no ajuste da escória, podem gerar inclusões no aço, interferindo assim em sua qualidade.

**Tabela 5.1: Composição química dos refratários dolomíticos e MgO-C fornecidos pela Magnesita.**

<b>Composição Química</b>	DOLOMITICO	MgO-C
SiO <sub>2</sub>	0,38	0,48
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	2,97
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	0,47
MnO	0,29	0,10
CaO	51,05	0,92
MgO	44,68	89,80
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,03
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00
ZrO <sub>2</sub>	0,00	0,00
C Total	2,17	8,53

### 5.1.2 MICROESTRUTURA

A Figura 5.1 apresenta micrografias da microestrutura dos materiais refratários investigados, antes (face fria) e após (face quente) submetê-los a temperaturas de serviço no revestimento de fornos panela. Com base nas análises químicas por microsonda acoplada ao MEV, apresentadas na Tabela 5.2 para a face quente e face fria, pode-se verificar no material dolomítico uma predominância do elemento CaO na face quente do tijolo e uma melhor distribuição no MgO-C. Isso aumenta sua sensibilidade em relação à hidratação, causando perda de resistência mecânica durante o processo.

Já o material MgO-C, por possuir em sua matriz mais homogênea, tem uma melhor resistência às solicitações advindas das condições de serviços da panela na aciaria.

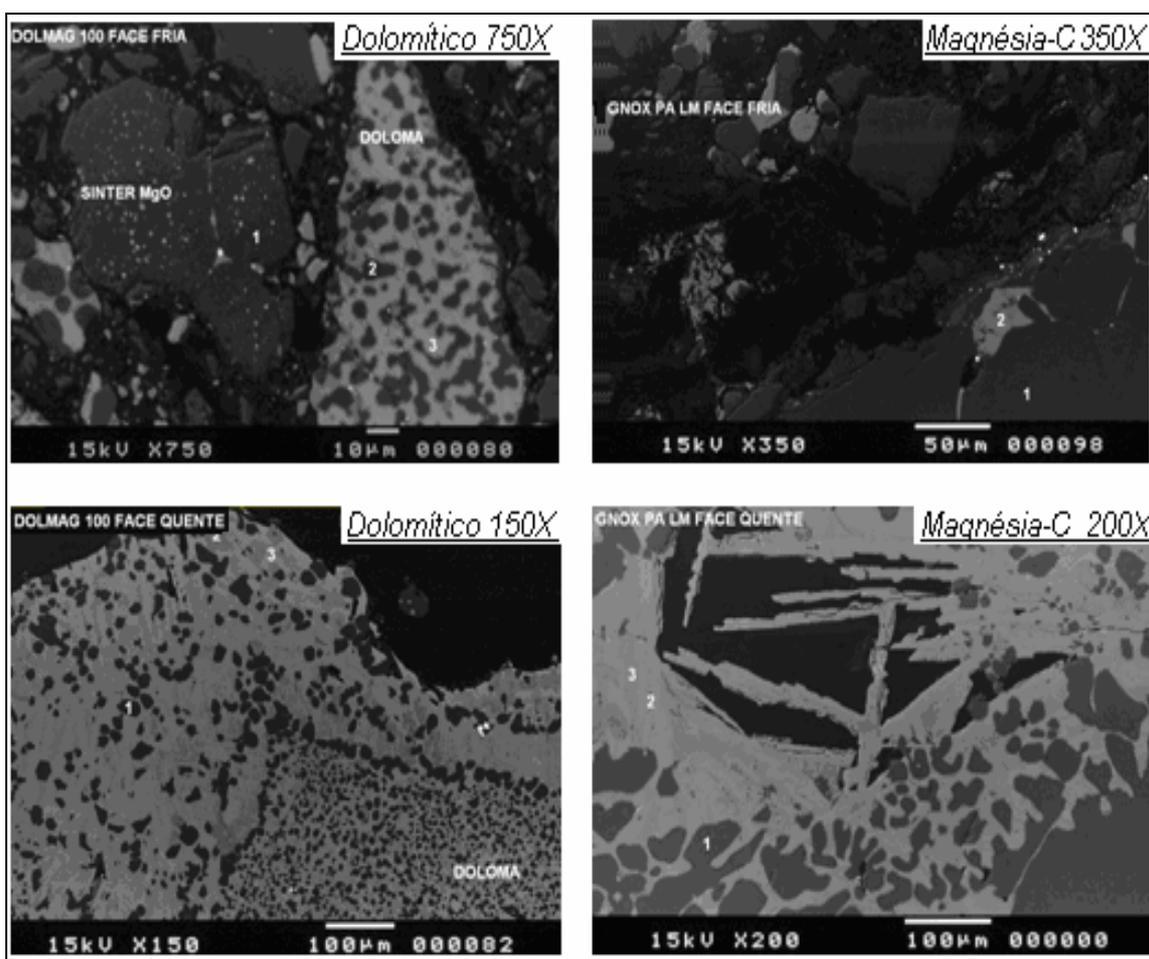


Figura 5.1: Micrografias por MEV da microestruturas dos materiais dolomítico e magnésia-carbono investigados, antes (face fria) e após (face quente) submissão a temperaturas de serviço no revestimento de fornos panela. Ponto 1.

Tabela 5.2: Análise química por microsonda EDS dos pontos analisados via MEV nas faces quentes e frias dos refratários dolomíticos e MgO-C investigados.

	Dolomítico			MgO-C		
<b>FACE QUENTE</b>						
<b>Ponto analisado</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
MgO	94,8	6,7	1,1	95,8	0,4	1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	0,2	1,5	0,5	30,8	1,1
SiO <sub>2</sub>	1,3	0	25,4	1,5	6,3	25,9
CaO	2,7	93	71,4	1,6	60,4	71,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,1	0,6	0,6	2,2	0,4
<b>FACE FRIA</b>						
<b>Ponto analisado</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
MgO	96,2	97,6	2,9	95	12,8	NA
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	0,3	0	3	0,3	NA
SiO <sub>2</sub>	1,6	1,3	0,04	1,3	37,6	NA
CaO	0,6	0,8	96,9	0,1	49,2	NA
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	0,1	0,1	0,5	0	NA

## 5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TERMOMECÂNICAS

### 5.2.1 DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE

A Tabela 5.3 apresenta o resultado da determinação da densidade e da porosidade aparente para os materiais refratários investigados. O MgO-C apresentou um valor de densidade aparente maior do que o dolomítico. Quanto à porosidade aparente, verifica-se que o material MgO-C mostrou valores bastante inferiores, o que indicaria uma menor propensão para a infiltração de escórias na microestrutura do material refratário.

Tabela 5.3. Valores de densidade e porosidade aparente dos materiais refratários investigados.

	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade aparente (%)
MgO-C	3,08	3,34
Dolomítico	2,94	4,14

### **5.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A TEMPERATURA AMBIENTE**

O material MgO-C apresentou uma resistência mecânica à compressão de 57,2 MPa, superior à 43,7 MPa do material dolomítico . Essa maior resistência mecânica nos irá gerar um melhor desempenho na parte estrutural quando em baixas temperaturas, resistindo melhor ao transportes, estocagem e manuseio ao longo de sua vida útil, segundo a literatura.

### **5.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE**

O material MgO-C apresentou um módulo de elasticidade no valor de 71,9 GPa, maior do que o dolomítico de 52,3 GPa. Isso indicaria uma maior resistência inicial para variações térmicas a que o material refratário como revestimento da panela está submetido em serviço. Além disso, esses valores sugerem que o refratário MgO-C possui uma maior ligação entre os grãos e menor número de trincas em sua estrutura, o que propiciaria um melhor desempenho e segurança operacional.

### **5.2.4 REFRATARIEDADE SOB CARGA**

Conforme Figuras 5.2 e Figura 5.3, verifica-se para o material dolomítico uma temperatura  $T_0 = 1640^{\circ}\text{C}$  e  $T_{06} = 1665^{\circ}\text{C}$  e para o material MgO-C a  $T_0 = 1700^{\circ}\text{C}$ . Logo, a temperatura  $T_0$  indica que não há variação de volume além da consequente da dilatação térmica para ambos os materiais. Já na temperatura  $T_{06}$  verifica-se uma variação de 6% no volume da amostra dolomítica. Portanto, à temperatura de  $1640^{\circ}\text{C}$ , poder-se-ia ter uma formação de fase líquida no tijolo dolomítico, o que indicaria uma propensão a um desgaste maior do dolomítico quando comparado com o tijolo MgO carbono.

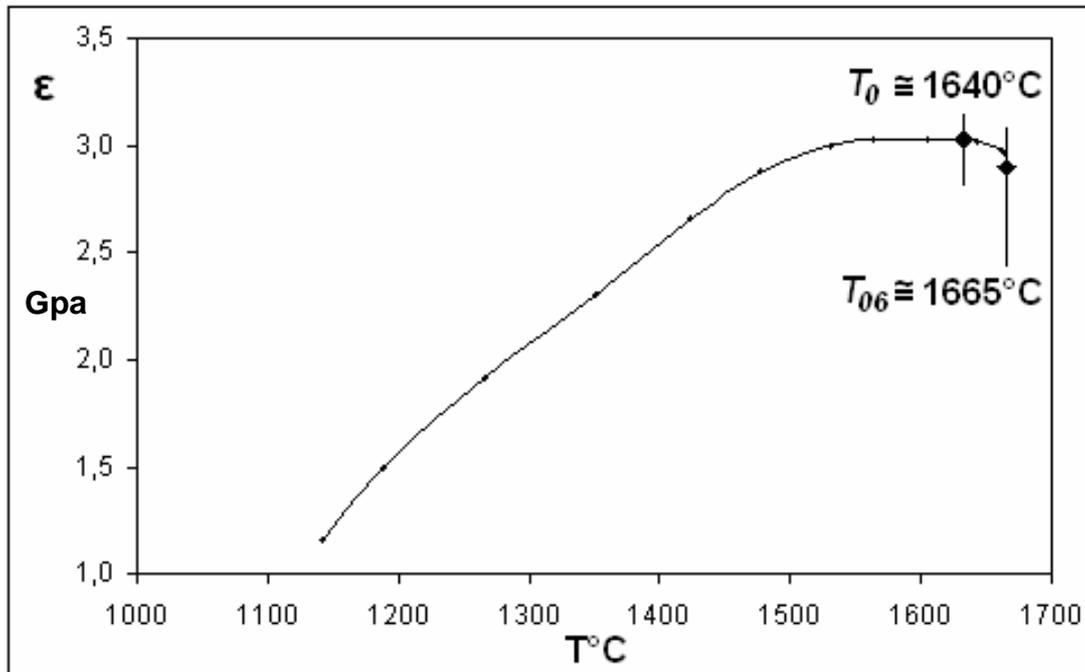


Figura 5.2. Refratariedade sob carga para o material refratário dolomítico investigado.

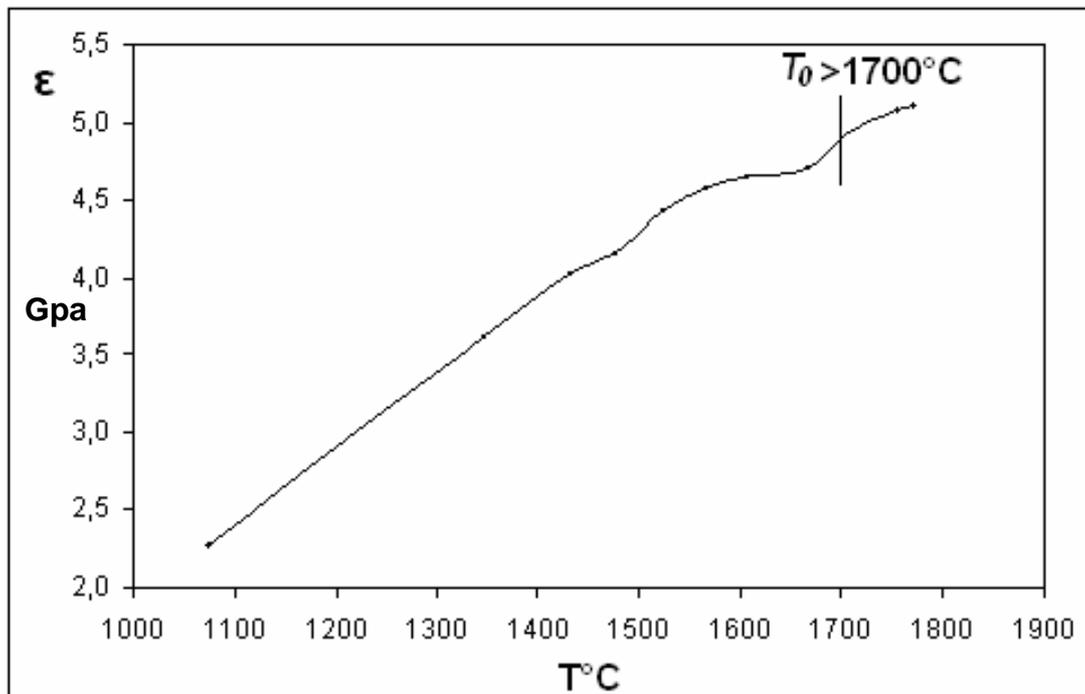


Figura 5.3. Refratariedade sob carga para o materiais refratário MgO-C investigado.

### 5.2.5 RESISTÊNCIA AO CHOQUE TÉRMICO E TERMOCLASE

A Figura 5.4 apresenta a variação do módulo de elasticidade em função do número de ciclos a que os materiais refratários investigados foram submetidos. O material refratário dolomítico apresenta uma queda substancial no valor do módulo de elasticidade. O valor inicial de 52,3 GPa cai para menos de 1 GPa já com 5 ciclos de choque, e chega a próximo de zero após 20 ciclos.

O módulo de elasticidade do material refratário de MgO-C decai de 71,9 MPa para 4,41 após 5 ciclos, chegando a 1,65 GPa após 20 ciclos. A diminuição do módulo de elasticidade está relacionada ao surgimento de trincas no interior do material, como forma de aliviar tensões de natureza térmica.

A menor queda do módulo de elasticidade indicaria uma maior resistência a tensões de natureza térmica, podendo-se associar a um melhor desempenho em serviço, considerando os ciclos térmicos inerentes às condições de serviço de uma panela na aciaria. Com isso, reduz-se os riscos de infiltração, ataques de junta e até mesmo lascamento dos tijolos.

Contudo, cabe salientar que o material dolomítico, apesar dos cuidados tomados, sofre com o processo de hidratação durante esse ensaio, sendo questionável, portanto, se o resultado inferior nos ciclos de choque térmico está somente associado a uma menor resistência ao choque térmico ou se é por formação de trincas do processo de hidratação do tijolo.

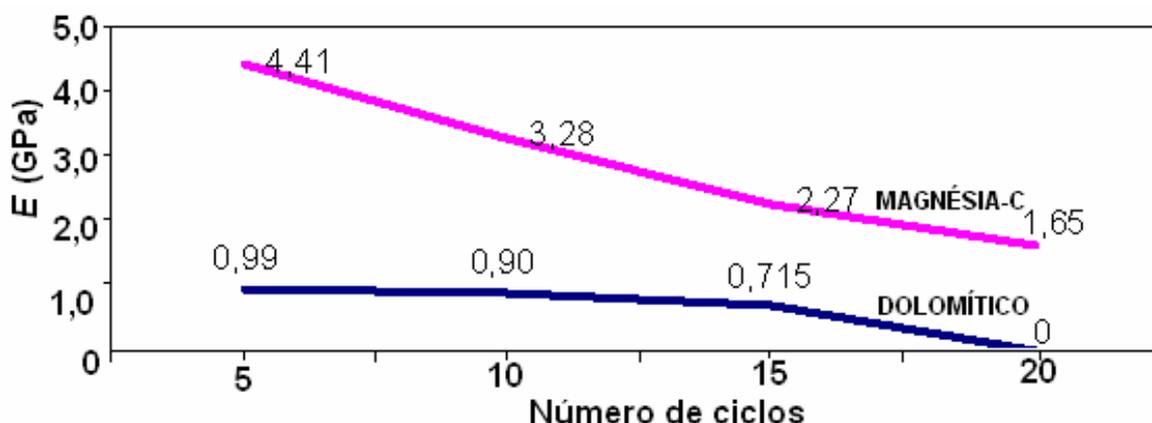


Figura 5.4. Variação do módulo de elasticidade em função dos números de ciclos de choque térmico a que os materiais dolomíticos e MgO-C investigados foram submetidos.

## 5.3 RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE ESCÓRIA

### 5.3.1 ANÁLISE PELO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE ESCÓRIAS

A Figura 5.5 apresenta a variação do desgaste (em mm/h e em percentual em massa) nos materiais refratários investigados em função do tempo de patamar nos ensaios de ataque por escória para uma temperatura de 1700°C. Pode-se observar um desgaste bem mais pronunciado do tijolo dolomítico quando comparado com o MgO-C. Entretanto, é importante comentar que ensaios de laboratório normalmente não propiciam a formação de uma camada à base de  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ , formado na prática industrial, na face quente dos tijolos dolomíticos. Esse *coating* protege o material refratário dolomítico, aumentando sua resistência ao ataque.

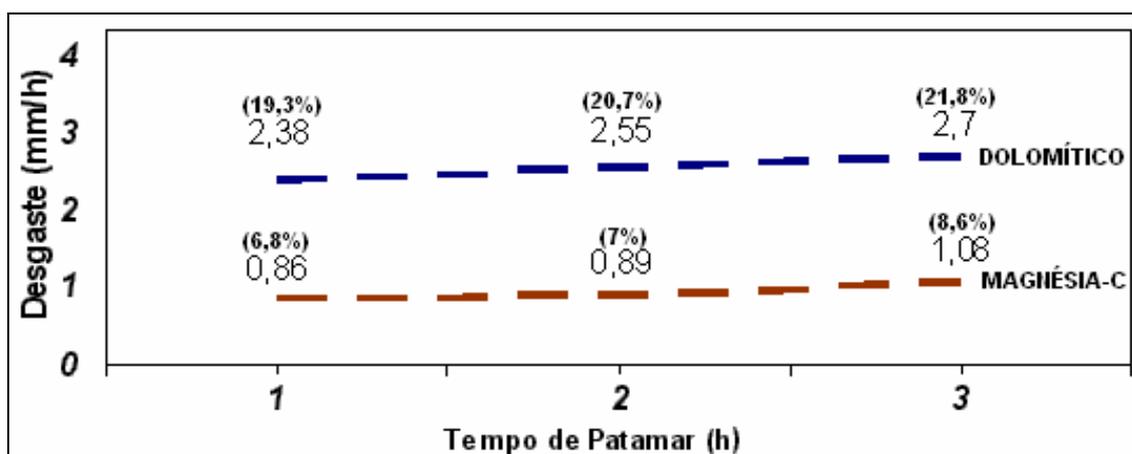


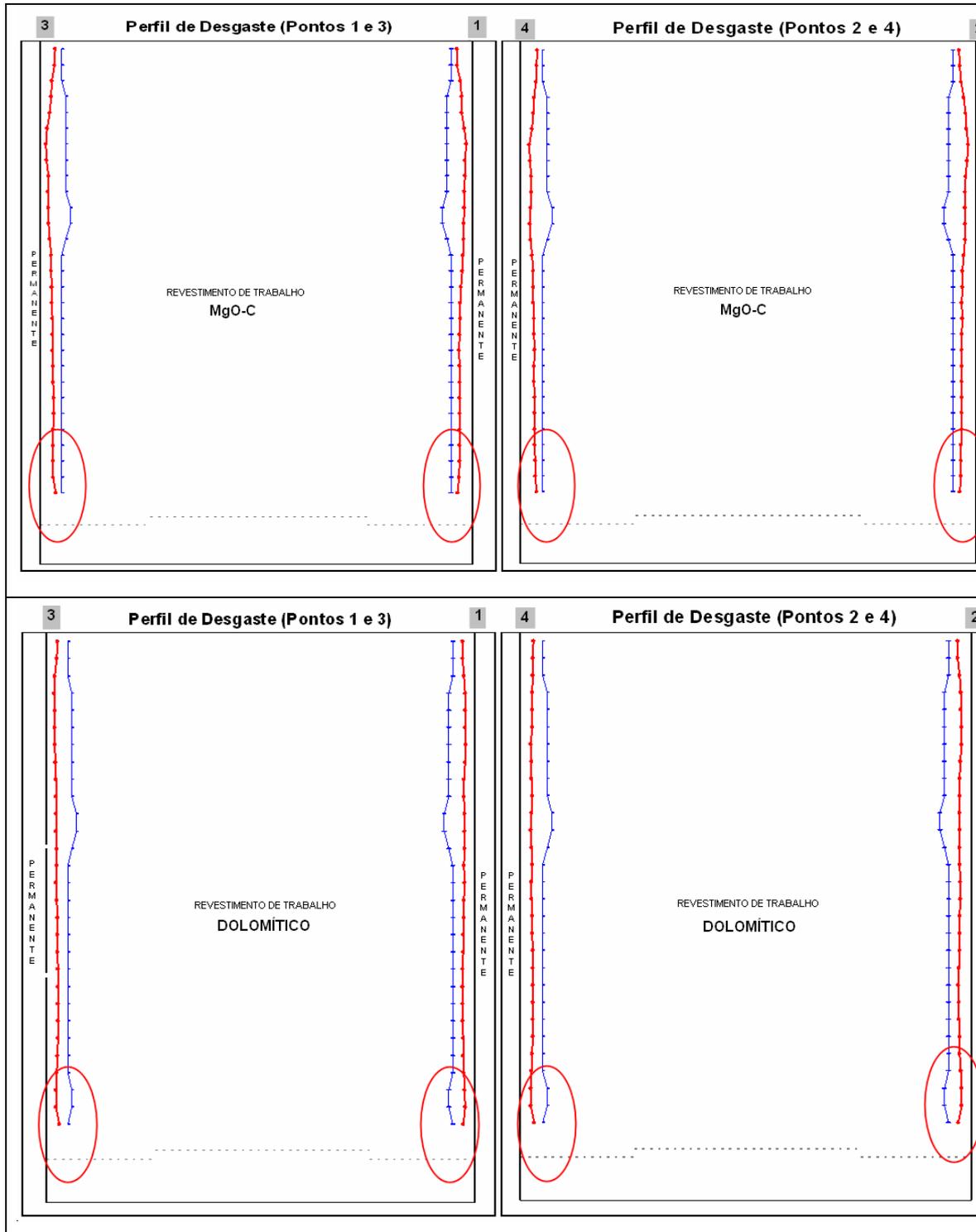
Figura 5.5. Resistência ao ataque de escória para ensaio em forno de escorificação rotativa.

### 5.3.2 ANÁLISE DOS RESIDUAIS APÓS CAMPANHA

A Figura 5.6 apresenta as regiões das placas onde foram medidos os residuais finais e iniciais dos refratários MgO-C e dolomíticos. Os pontos indicados por 1, 2, 3 e 4 são relativos aos pontos utilizados como referência na placa.

O resultado comparativo entre os dois materiais refratários investigados quanto ao residual da espessura das fiadas (para um inicial de 127 mm) mostra que o MgO-C possui, ao final da campanha, residuais maiores do que o dolomítico, conforme Tabela 5.4. Além disso, pelo potencial de corridas

apresentado, o refratário MgO-C com uma média de 85 de corridas na linha de metal, contra uma média de 73 corridas do refratário dolomítico, apresenta uma maior segurança operacional, com uma redução de custo por menor número de saídas antecipadas de painéis, isto é, maior vida das mesmas.



**Figura 5.6. Regiões das painéis onde foram medidos os residuais finais e iniciais dos refratários MgO-C e dolomíticos. Os pontos indicados por 1, 2, 3 e 4 são relativos aos pontos utilizados como referência na painél (ver Tabela VI).**

**Tabela 5.4. Espessura final residual dos tijolos MgO-C e dolomíticos investigados (espessura inicial 127 mm). A tabela abaixo não considera as fiadas de 1 a 4, por estarem abaixo do fundo.**

Fiada	Dolomítico					MgO-C				
	1	2	3	4	Potencial Corridas	1	2	3	4	Potencial corridas
<b>20</b>	61	65	63	66	70	59	67	65	67	64
<b>19</b>	59	61	60	62	68	64	73	67	73	69
<b>18</b>	62	63	63	63	71	71	74	70	73	76
<b>17</b>	64	65	66	65	73	74	77	72	74	79
<b>16</b>	65	67	67	67	75	73	75	73	76	81
<b>15</b>	67	67	68	69	77	77	77	72	79	80
<b>14</b>	69	71	69	70	80	80	77	75	81	84
<b>13</b>	70	72	70	71	81	79	78	79	78	90
<b>12</b>	70	71	70	71	81	79	77	80	79	88
<b>1</b>	69	71	71	71	79	79	76	81	82	86
<b>10</b>	68	66	70	70	76	79	78	82	82	89
<b>9</b>	6	65	67	67	75	79	78	79	83	90
<b>8</b>	63	60	64	63	69	80	79	78	82	90
<b>7</b>	57	55	57	58	63	79	81	77	84	88
<b>6</b>	55	56	59	59	63	83	83	78	85	90
<b>5</b>	64	75	77	78	74	89	89	92	92	116
					<b>Dolomítico</b>	<b>MgO-C</b>				
<b>MD Linha de Metal</b>					73	85				
<b>MD Fiadas de 5 a 10</b>					70	94				

O fator preponderante para essa análise concentra-se entre as fiadas 5 a 10 (marcadas com círculos vermelhos no rodapé da panela), as quais sofrem um ataque localizado, devido ao acúmulo de escória nesse local. Logo, os residuais medidos para o MgO-C com potencial médio para 94 corridas em comparação ao dolomítico com potencial médio de 70 corridas, sugerem uma maior segurança operacional.

## **5.4 ANÁLISE DO PERFIL TÉRMICO DA PANELO EM OPERAÇÃO**

De acordo com o resultado apresentado na Figura 5.7, para as temperaturas de 1550°C e 1680°C, as panelas montadas com os refratários

MgO-C apresentam um perfil de maiores temperaturas do que as apresentadas nos dolomíticos.

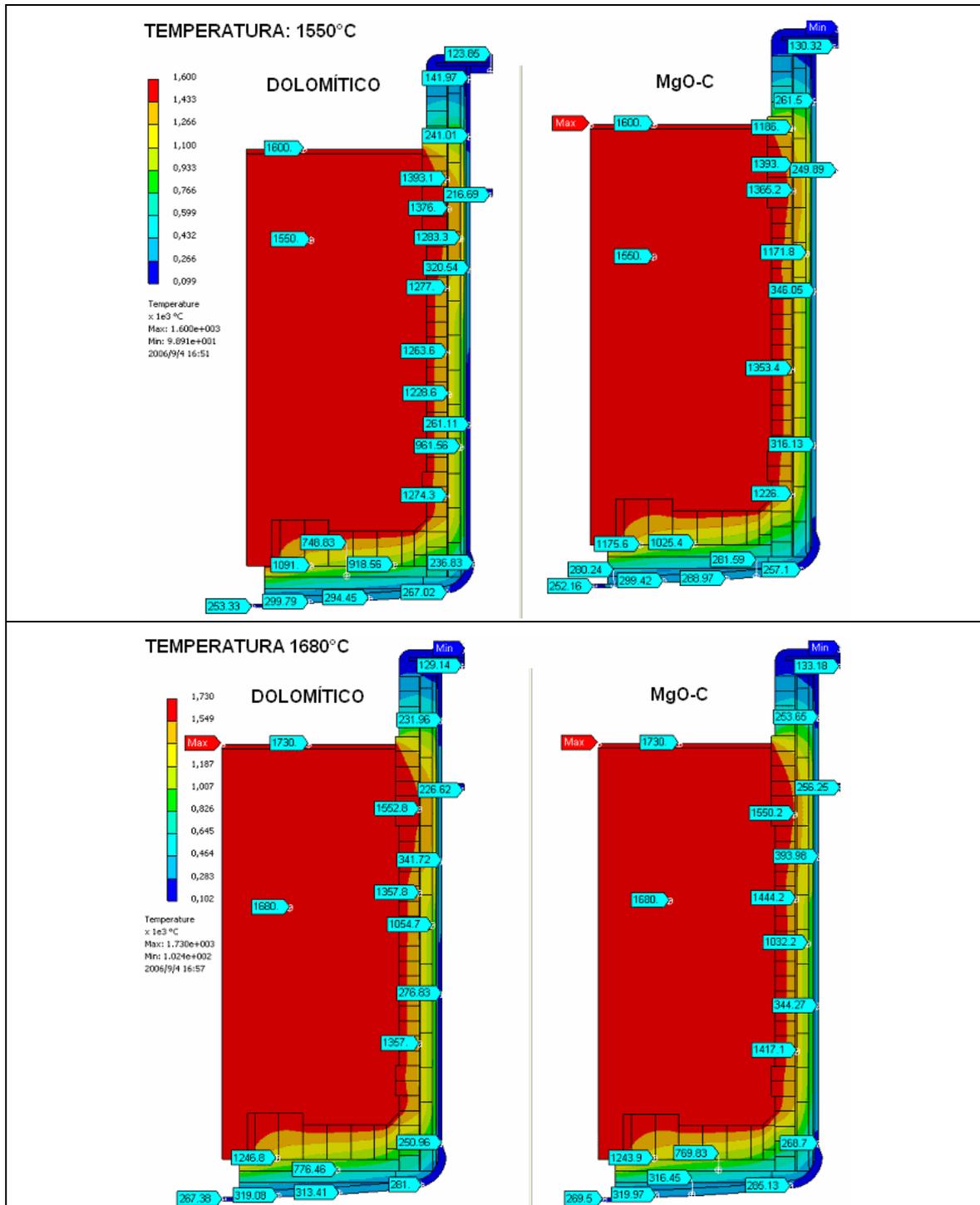


Figura 5.7. Perfil térmico apresentado para as painéis construção mecânica, montadas com refratários dolomíticos e MgO-C, para as temperaturas de 1550°C e 1680°C.

Contudo, essas temperaturas estão dentro dos limites aceitáveis para aços utilizados em carcaças metálicas. Mesmo com essa diferença de

temperatura ao longo da carcaça, no momento do desmanche da panela, nota-se que os tijolos MgO-C possuem um residual similar ao dos dolomíticos, para uma vida maior da panela. Logo, a diferença de temperatura deve-se à quantidade de carbono, que está em quantidade maior no material MgO-C.

## 6 CONCLUSÕES

A avaliação comparativa entre os materiais dolomíticos e MgO-C quanto a suas propriedades e desempenho permitiu inferir as seguintes conclusões quanto a uma melhor montagem refratária para o processo da Aços Especiais Brasil – Unidade Charqueadas, visando a segurança operacional e desempenho:

- Em relação à densidade e porosidade aparente, verifica-se que o material MgO-C apresenta uma microestrutura mais fechada, o que propiciaria uma melhor resistência ao ataque de escórias, reduzindo lascamentos e quedas de tijolos ao longo da campanha da panela;
- No que diz respeito a problemas de estocagem e permanência do material montado à temperatura ambiente, o material MgO-C nos indica ter melhores características, pois sua resistência mecânica à temperatura ambiente é maior do que a do refratário dolomítico.
- Os resultados relacionados ao módulo de elasticidade mostraram que o material MgO-C deve possuir maior integridade interna o que reflete no comportamento mecânico;
- Em relação às avaliações químicas dos materiais, com a redução dos teores CaO e o aumento do percentual de C e MgO, ocorre o aumento da resistência mecânica do material MgO-C e uma redução dos riscos de hidratação do material. Contudo, o ajuste da escória no vazamento do forno elétrico a arco é fator determinante para evitar desgastes acentuados devido à busca de saturação de MgO na escória;
- A resistência ao ataque de escória e resistência ao choque térmico no refratário MgO-C apresentaram-se superiores às do refratário dolomítico;
- A análise dos residuais do refratário MgO-C indica uma maior segurança operacional, principalmente entre as fiadas 5 à 10 no perfil do revestimento refratário da panela, onde o ataque ao rodapé da panela era ponto preocupante no processo da Aços Especiais Brasil – Unidade Charqueadas.
- A temperatura de trabalho do refratário MgO-C é maior do que a do refratário dolomítico, mas isso não significa redução de residual ou agressão à

carcaça metálica, visto que essa temperatura, na maioria das vezes mantém-se dentro de um padrão aceitável pelo projeto da panela.

É possível concluir que o refratário MgO-C potencialmente proporcionaria um melhor desempenho em processo e eliminaria o principal problema que hoje caracteriza as panelas construção mecânica da Aços Especiais Brasil – Unidade Charqueadas, que é o desgaste acentuado no rodapé da panela. A substituição do refratário dolomítico pelo MgO-C, tecnicamente, apresenta-se, assim, vantajoso.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho investigativo permite sugerir para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

i) Otimizar a montagem refratária da linha de escória e sobrelinha da panela, visando uma redução de custo;

ii) Analisar os principais pontos de desgaste na linha de escória das panelas, reduzindo os ataques aos refratários de segurança;

iii) Otimizar a espessura nas fiadas 20 à 23 onde tem se a transição linha de metal e linha de escória visando aumentar a segurança operacional na troca de refratário;

iv) Acompanhar mais detalhadamente a parte termográfica da panela ao longo de suas campanhas, para verificar possíveis problemas nas carcaças metálicas ao longo do tempo;

v) Ajustar a adição de MgO no vazamento do forno elétrico, para reduzir desgastes localizados na linha de escória, o que ocasiona saídas antecipadas das panelas;

vi) Substituir o fundo da panela para um material similar ao da parede, visando reduzir diferenças entre os coeficientes térmicos dos refratários.

## REFERÊNCIAS

1. ASOCIACIÓN LATINO AMERICANA DE FABRICANTES DE REFRACTARIOS (ALAFAR), Producción de las Industrias Usuarias de Refractarios, v.1, p. 1-6, 2008. [www.alafar.com](http://www.alafar.com) , acessado em 15/06/09
2. World Steel Association, Steel Statistics Archives 2008; [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org), acessado em 10/05/09.
- 3 NAKAHARA, T., Innovation in a Borderless World Economy. **Research & Technology Management**, p.7-9, May/June, 1997. Editora Arte e Ciência
- 4 COUTINHO, L., Globalização e Capacitação Tecnológica nos Países de Industrialização Tardia: Lições para o Brasil. *Gestão e Produção*, v.3, n.1, p. 49-69, abril, 1996. Editora Arte e Ciência
- 5 ARAUJO, L. A., **Manual de Siderurgia – Produção**, v.1, p. 329-468, São Paulo, 1997. Editora Arte e Ciência
- 6 U.S. STEEL. The Making, Shaping and Treating of Steel – Chapter 18 – **Electric Furnace Steelmaking**- Pittsburg, EUA. 1985. Editora Arte e Ciência
- 7 SCHAFFER, H. *et al.*, Automatic Arc Furnace Control. **Iron and Steel Engineer**, agosto 1986. Editora Arte e Ciência
- 8 OREHOSKI, M. A. Ladle Refining Process, **Iron and Steel Engineer**, v. 63, n.1, janeiro 1986. Editora Arte e Ciência
- 9 International Iron and Steel Institute, [www.IISI.com](http://www.IISI.com), acessado em 15/06/09
- 10 RELLERMEYER, H. Degassing and Ladle Treatment fo Production of Special Steel Grades. MPT- Metallurgical Plant and Technology, v.1, 1986. Editora Arte e Ciência
- 11 COUTINHO, E. S., Projetos de Revestimentos Refratários- Fundamentos, p. 97-119, **Curso de Refratários para Aciaria Elétrica**, 20 a 21 Março 2000, Belo Horizonte, Brasil. ABM
- 12 HANDBOOK OF REFRACTORIES PRATICE, Japan: The Technical Association of Refractories, 1998. Editora Arte e Ciência

- 13 ACI-510 Gerdau Refratários Aplicados a Aciaria Elétrica pág. 10; Módulos de Treinamento em Siderurgia da Gerdau Aços Especiais Piratini. Aciaria 2008. [www.gerdau.com.br](http://www.gerdau.com.br), acessado em 10/03/09
- 14 CASSETE, W. Q., Refratários para Uso em Forno-Panela, p. 135-151, **Curso de Refratários para Aciaria Elétrica**, 20 a 21 de março 2000, Belo Horizonte, Brasil.
- 15 FRUEHAM, R.J. Ladle Metallurgy: Principles and Practices. USA: **Iron and Steel Society**, 1985.
- 16 RIBEIRO, D. B. e SAMPAIO, R.S., **Refino Secundário dos Aços**. São Paulo, ABM, 1996.
- 17 YOUNG, J., CAMERON, S. SCHADE, H., Clean Steel Systems for Ladle and Tundish Operation. USA: **Iron and Steel Society**, 1999.
- 18 SAVAGE, B., Steelmaking Refractories: What the Mini and Integrated Mills can learn from each other. In. **McMASTER SYMPOSIUM ON IRON AND STEELMAKING**, 26, Ontário, 1998,. McMaster University, 1998.
- 19 MODERN REFRACTORIES PRACTICE. USA: Harbison-Walker Refractories, 1992.
- 20 ROUTSCHKA, G., **Pocket Manual; Refractories Materials**. v.1, ed. Essen: Vulkan-Verlag, Alemanha, 1997.
- 21 DUARTE, A. K., Mecanismos Gerais de Desgaste em Refratários, p. 77-95, **Curso de Refratários para Aciaria Elétrica**, 20 a 21 de março 2000, Belo Horizonte, Brasil.
- 22 OLIVEIRA, S. P., Escórias e Mecanismos de Desgaste de Refratários para Forno Panela. In: **Curso sobre Fundamentos, Operación y Refractories Para Horno Cucharas**, ALAFAR, San Nicolas, Argentina, 1997.
- 23 Magnesita, Ensaio Físicos e Propriedades Mecânicas dos Refratários, [www.magnesita.com.br](http://www.magnesita.com.br), acessado em 10/04/09
- 24 Materiais Refratários Básicos, Materiais Refratários – DEMAT-UFRGS; Laboratório de Cerâmicos, 2008. [www.ufrgs.br/lacer](http://www.ufrgs.br/lacer), acessado em 20/10/09.

- **NBR 6220:** Materiais refratários densos conformados - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida, 1997.
- **NBR 6224:** Materiais refratários densos conformados - Determinação da resistência à compressão a temperatura ambiente, 2001.
- **NBR 14641:** Materiais refratários densos conformados - Determinação da velocidade ultra-sônica, 2001.
- **NBR 6223:** Material refratário - Determinação da refratariedade sob carga, 1995.