



**Universidade Federal do Pará
Campus de Marabá
Faculdade de Engenharia de Materiais**

Dennys Heverson Silva Brandão

**“ESTUDO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA TÉRMICA E QUÍMICA NO
DESGASTE DE REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS DE PAINÉIS DE AÇO”**

**Marabá – PA,
2011.**

Dennys Heverson Silva Brandão

“Estudo dos fatores de influência térmica e química no desgaste de revestimentos refratários de painéis de aço”

Trabalho de conclusão de curso orientado pelo Prof.M.Sc. Alacid do Socorro Siqueira Neves, apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Materiais.

**Marabá - PA,
2011.**

Dennys Heverson Silva Brandão

“Estudo dos fatores de influência térmica e química no desgaste de revestimentos refratários de painéis de aço”

Trabalho de conclusão de curso orientado pelo Prof.M.Sc. Alacid do Socorro Siqueira Neves, apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Materiais.

Banca Examinadora

Prof. M.Sc. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Orientador

Prof. Esp. Luís Fernando Nazaré Marques
Examinador

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra
Examinador

Apresentado em: ____/____/____

Conceito: _____

Marabá – PA,
2011.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, aos meus familiares e amigos que estiveram comigo durante toda a jornada, e em especial ao meu quarteto fantástico: Leônidas, Sandra, David e Jéssica.

RESUMO

A busca contínua na melhoria de produtividade das aciarias tem levado a utilização das tecnologias de metalurgia secundária, principalmente o forno panela. Nesse sentido os refratários dos revestimentos das panelas usadas nesse equipamento estão sujeitos a diversas solicitações que causam elevadas taxas de desgaste. O perfeito conhecimento dos mecanismos de desgaste dos refratários é fator importante na definição das qualidades a serem utilizadas. O trabalho faz uma revisão do ciclo operacional completo de uma panela dentro de uma aciaria e os principais fatores de influência térmica e química obtidos no desgaste de revestimentos refratários para panelas de aço como os controles de pré-aquecimento, espera para vazamento, resistência ao choque térmico, controle do arco elétrico e análise de escória; bem como os principais cuidados na operação de modo a aumentar a vida útil dos revestimentos.

Palavras-chave: desgaste, revestimento, refratário, panela, aço.

ABSTRACT

The continued drive to improve productivity of steel mills has led to use of secondary metallurgy technologies, especially the oven ladle. For this, the refractory linings of the pots used in this equipment are subject to various demands that cause high wear rates. The perfect knowledge of the mechanisms of wear of refractories is an important factor in defining the qualities to be used. The work is a complete revision of the operating cycle of a ladle in a steel mill and the main influencing factors obtained in thermal and chemical wear of refractory linings for steel ladles and controls pre-heating is expected to leak, shock resistance thermal control of the arc and analysis of slag, as well as major care in the operation to increase the service life of coatings.

Keywords: wear, coatings, refractory, ladle, steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1	Classificação de materiais refratários.	15
Ilustração 2	Mercado de produtos refratários no Brasil.	17
Ilustração 3	Desenho esquemático de Forno-Panela.	18
Ilustração 4	Estações do tipo forno panela (a) e (b).	19
Ilustração 5	Fluxograma das operações no FP.	20
Ilustração 6	Desenho esquemático da parte metálica de uma panela de aço.	23
Ilustração 7	Desenho esquemático das regiões do revestimento refratário das panelas de aço.	25
Ilustração 8	Desenho esquemático da linha de escória de uma panela de aço aço.	27
Ilustração 9	Desenho esquemático de panela com fundo livre.	28
Ilustração 10	Desenho esquemático de panela com fundo preso.	28
Ilustração 11	Variação de altura e qualidade dos tijolos do fundo livre de uma panela.	29
Ilustração 12	Desenho esquemático dos ciclos de produção e de panelas.	31
Ilustração 13	Energia acumulada nas paredes refratárias de uma panela para diferentes temperaturas de chama do aquecedor.	33
Ilustração 14	Comportamento da temperatura do aço (a) e do revestimento refratário (b) durante o período de espera para diferentes condições de pré aquecimento.	34
Ilustração 15	Índice de encharque durante a espera para o vazamento.	35
Ilustração 16	Índice de encharque durante os três primeiros ciclos de uma panela nova.	36
Ilustração 17	Índice de encharque de uma panela durante o tempo com aço.	37
Ilustração 18	Comparação de resistência ao choque térmico entre classes de refratários.	38
Ilustração 19	Comprimento do arco elétrico X Altura da linha de escória.	40
Ilustração 20	Grupos de refratários.	41
Ilustração 21	Características do fenômeno de penetração de um líquido em um meio sólido.	42
Ilustração 22	Saturação em MgO para escórias do sistema CaO-MgO-SiO ₂ à 1600 °C.	43

LISTA DE SIGLAS

SINOBRAS	– Siderúrgica Norte Brasil S.A.
EPI	– Equipamentos de Proteção Individual
AF	– Alto Forno
FEA	– Forno Elétrico a Arco
FP	– Forno Panela
LC	– Lingotamento Contínuo
PPC	– Pátio de Preparação do Cestão
CO	– Monóxido de Carbono
O₂	– Oxigênio
C	– Carbono
Fe	– Ferro
FeO	– Óxido de Ferro
MLC	– Máquina de Lingotamento Contínuo
UED	– Unidade de Extração e Desempeno
PTL	– Pátio de Tarugos Lingotados
CaO	– Óxido de Cálcio (Cal)
SiO₂	– Dióxido de Silício (Sílica)
SAE	– <i>Society of Automotive Engineers</i> - EUA
LD	– <i>Linz e Donawitz</i> - EUA
VG	– Válvula Gaveta
SIG	– Sistema de Injeção de Gás
RCT	– Resistência ao choque térmico
EBT	– <i>Eccentric Bottom Tapping</i> - EUA

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVO	13
3.	REFRATÁRIOS	14
3.1	CLASSIFICAÇÕES DE MATERIAIS REFRATÁRIOS	14
3.2	REFRATÁRIOS PARA SIDERURGIA	16
3.3	REFRATÁRIOS DOLOMÍTICOS	17
4.	O FORNO PANELA	18
5.	A PANELA DE AÇO	22
5.1	PARTE METÁLICA	22
5.2	PARTE REFRATÁRIA E ISOLANTE	23
5.2.1	Principais regiões de um revestimento e tipos de refratários	23
5.2.1.1	Borda Livre	25
5.2.1.2	Linha de escória	26
5.2.1.3	Linha de metal	27
5.2.1.4	Fundo	28
5.2.1.5	Zona de Impacto	29
6.	CICLO DE PANELAS	30
7.	FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESGASTE	32
7.1	FATORES TÉRMICOS	32
7.1.1	Pré-aquecimento da panela	32
7.1.2	Espera para o vazamento	34
7.1.3	Índice de encharque das panelas (IE)	35
7.1.4	Período com Aço	36
7.1.5	Face quente	37
7.1.6	Resistência ao choque térmico (RCT)	38
7.1.7	Controle do arco elétrico	38
7.2	FATORES QUÍMICOS	40
7.2.1	Escória	42
7.2.1.1	A Importância da Análise de Escória	44
8.	CONCLUSÃO	45
8.1	FATORES TÉRMICOS	45
8.2	FATORES QUÍMICOS	47

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTRODUÇÃO

Material refratário ou produto refratário são todos aqueles materiais, naturais ou manufaturados, não metálicos (não excluindo aqueles que contenham algum componente metálico) que podem suportar, sem se deformar ou fundir, temperaturas elevadas em condições específicas de uso. Apresentam grande versatilidade e atendem a todas às necessidades de aplicação em zonas de média e alta sollicitação, e são utilizados geralmente em fornos de aquecimento, caldeiras, fornos de cerâmica, em fundições e fornos de elevada temperatura, como também em aplicações mais triviais como churrasqueiras.

No setor siderúrgico, em meados de 1960, enquanto a produção de aço beirava os 2,6 milhões de toneladas o Brasil produzia um milhão de toneladas por ano de refratários. Hoje, o país produz menos de 450 mil toneladas de refratários/ano, contra 27 milhões de toneladas de aço por ano. À primeira vista, esses números parecem revelar que pesquisa e desenvolvimento em refratários no Brasil tornou-se um péssimo negócio. Mas, na prática, eles indicam que o refratário vem se adaptando a uma tendência da siderurgia em nível mundial de usar revestimentos térmicos de melhor qualidade, mais resistentes e de menor volume, tanto que, nos anos 70, o consumo de refratários nas siderúrgicas brasileiras era de cerca de 30 quilos por tonelada de aço. Atualmente, para cada tonelada vazada nas aciarias das usinas são consumidos 11 quilos de refratário, representando uma produtividade muito próxima à do Japão (7 kg/t), que é referência mundial em tecnologia para o setor siderúrgico.

Não há dúvidas, portanto, que a evolução da pesquisa e desenvolvimento em refratário nas Universidades tem tido um peso significativo na melhoria dos produtos siderúrgicos, contribuindo para o balanceamento térmico e impedindo inclusões que possam comprometer a qualidade do produto final. O fato das siderúrgicas precisarem de insumos cada vez mais nobres, buscando otimizar seus resultados e aumentar a competitividade.

Os revestimentos refratários das panelas estão expostos ao ambiente severo do processo de refinaria secundária, que envolve elevadas temperaturas, escórias agressivas e elevados tempos de residência.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é fazer um estudo dos principais fatores de influência térmica e química no desgaste de revestimentos refratários de panelas de aço, revestimento que está sujeito a diversas solicitações que potencializam seu desgaste podendo muitas vezes comprometer a produtividade da Aciaria e a segurança dos colaboradores que controlam o processo em tais equipamentos.

3. REFRAATÁRIOS

Segundo Oliveira, S.P. (1997), Materiais cerâmicos com composição química e propriedades que o tornam resistentes a temperaturas elevadas, sendo empregados em equipamentos industriais que em geral estão sujeitos a esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações.

Materiais refratários são tipicamente aplicados em revestimento de fornos para fusão de metais, fabricação de vidros, tratamento térmico, geração de energia e moldes para fundição, tendo seu desempenho diretamente ligado ao material empregado na sua fabricação (CALLISTER JR.,W.D., 2002).

Desta forma são classificados quanto a matéria prima/componente químico principal e método de conformação.

3.1 CLASSIFICAÇÕES DE MATERIAIS REFRAATÁRIOS

Os materiais refratários são classificados de acordo com a matéria prima utilizada para fabricá-los como podemos observar no quadro da Ilustração 1.

CLASSIFICAÇÃO BASEADA NA ORIGEM	MATÉRIAS PRIMAS	CORRESPONDÊNCIA APROXIMADA C/ OUTRAS NOMENCLATURAS E CLASSIFICAÇÕES
Refratário de Sílica $\text{SiO}_2 > 93\%$	Quartzito, arenito, areia de sílica, sílex	Refratário de Sílica, Refratário Silicoso
Refratário de Alumina Sílica - $45\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 85\%$	Bauxito, cianita, silimanita, diaspório, argila, mulita sintética, alumina bayer, alumina eletrofundida	Refratário de alta-alumina, refratário aluminoso, refratário de mulita
Refratário de Alumina Carbono	Alumina bayer, alumina tabular, alumina eletrofundida, coríndon, grafita, negro de fumo, piche, resina	Refratário de alumina-carbono
Refratário de Magnésia	Magnésia sinterizada, sinter de magnésia de água do mar, magnésia eletrofundida	Refratário de magnesita, refratário magnesiano, refratário magnésítico
Refratário de cromita	Cromita	Refratário cromítico
Refratário de zircônia	Zircônia	Refratário de Zircônia
Refratário de Carbono	Grafita, coque, coque de petróleo, negro de fumo, piche, resina	Refratário de carbetto, Refratário de grafita
Refratário de Magnésio-Carbono	Magnésia sinterizada, sinter de magnésia de água do mar, magnésia eletrofundida, grafita, coque, piche, negro de fumo, resina.	Refratário de magnésia-grafita, Refratário de magnési-piche

Ilustração 1 - Classificação de materiais refratários. Fonte: OLIVEIRA, 1997.

Os materiais refratários podem ainda ser classificados de acordo com seu método de conformação como:

- Moldados – peças, tijolos, placas e blocos;
- Argamassas – secas, úmidas e de pega ao ar ou à quente;
- Moldáveis – massas de socar, de projeção e de tamponamento.

3.2 REFRAATÓRIOS PARA SIDERURGIA

Os refratários para siderurgia englobam uma vasta gama de materiais (óxidos, carbetos, boretos, carbono e suas misturas) que possuem propriedades superiores (térmicas, físico-químicas, estruturais) quando utilizados em elevadas temperaturas (maiores que 1580 °C), capazes de resistirem a variações ambientais em meios agressivos (aço, gusa, escória) por um determinado período de tempo.

Esses materiais devem apresentar características necessárias para resistir às solicitações anteriormente mencionadas, além de apresentar baixo custo, quando comparados ao tempo de utilização e à produção nesse período, garantindo a segurança pessoal e do equipamento, não prejudicando a qualidade do produto, no caso deste trabalho, o aço.

Atualmente o mercado de materiais refratários no Brasil é dominado pela siderurgia, detentora de aproximadamente 67% do mercado nacional, tendo como segundo concorrente deste mercado a indústria de cimentos com apenas 13% conforme explicitado na Ilustração 2.

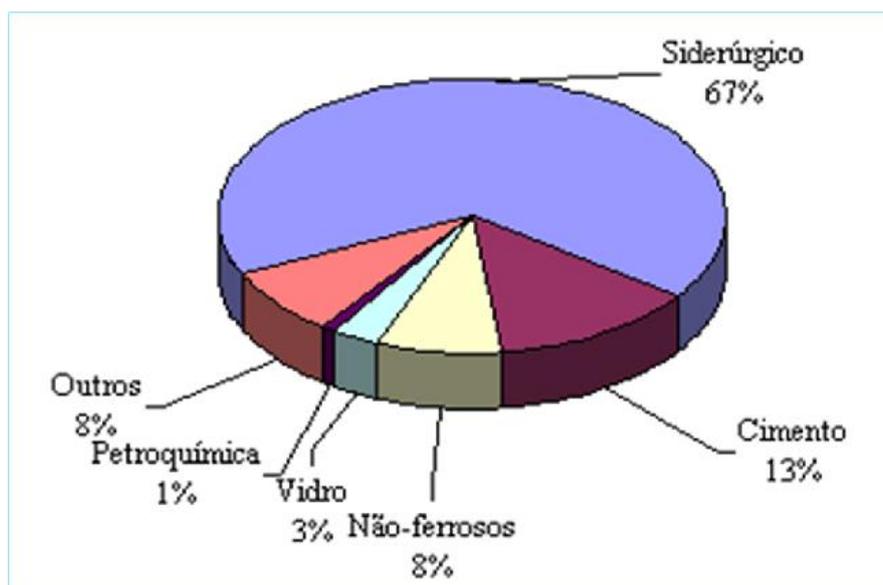
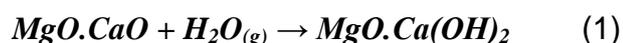


Ilustração 2 - Mercado de produtos refratários no Brasil. Fonte: FERREIRA, 2004.

3.3 REFRAATÓRIOS DOLOMÍTICOS

Refratários dolomíticos são compostos de 59%CaO, 39%MgO e 2% de impurezas, obtidos através da sinterização de dolomita ($MgCO_3CaCO_3$). A Dolomita para uso refratário é obtida a partir da calcinação de minérios dolomíticos em temperaturas elevadas. A Dolomita calcinada pode ser usada na forma de concentrados granulares para reparos de revestimentos refratários ou para fabricação dos tijolos utilizados nos revestimentos refratários de painéis de aço e fornos rotativos de cimento (OLIVEIRA, S.P., 1997).

O processo de fabricação se dá a elevadas temperaturas, e, devido a presença de CaO, os refratários dolomíticos apresentam significativa tendência à hidratação em temperaturas menores que 600 °C, conforme reação descrita na equação 1.



4. O FORNO PANELA

O termo forno panela pode não ser o mais adequado, pois, na realidade, a instalação de refino secundário é constituída basicamente de uma abóbada equipada com eletrodos (normalmente são utilizados três eletrodos em fornos de trifásicos de corrente alternada), os sistemas de adição de ligas e amostragens de temperatura e composição, dispositivos para agitação do banho com injeção de gases inertes ou equipamentos eletromagnéticos, sistema de captação de fumos e dispositivos auxiliares para deslocamento do carro porta-panela (Ilustração 3).

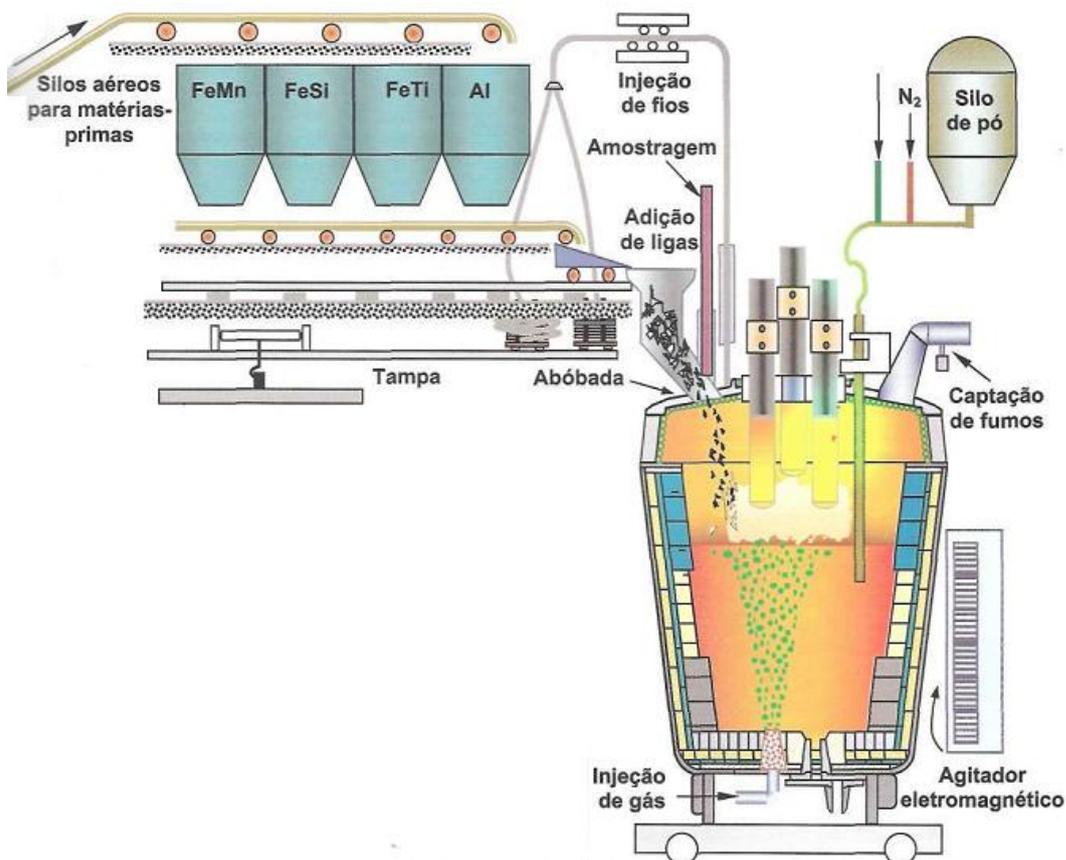


Ilustração 3 - Desenho esquemático de Forno-Panela. Fonte: RIBEIRO, 1996.

Nas Ilustrações 4(a) e 4(b) são apresentadas imagens de estações do tipo forno panela.

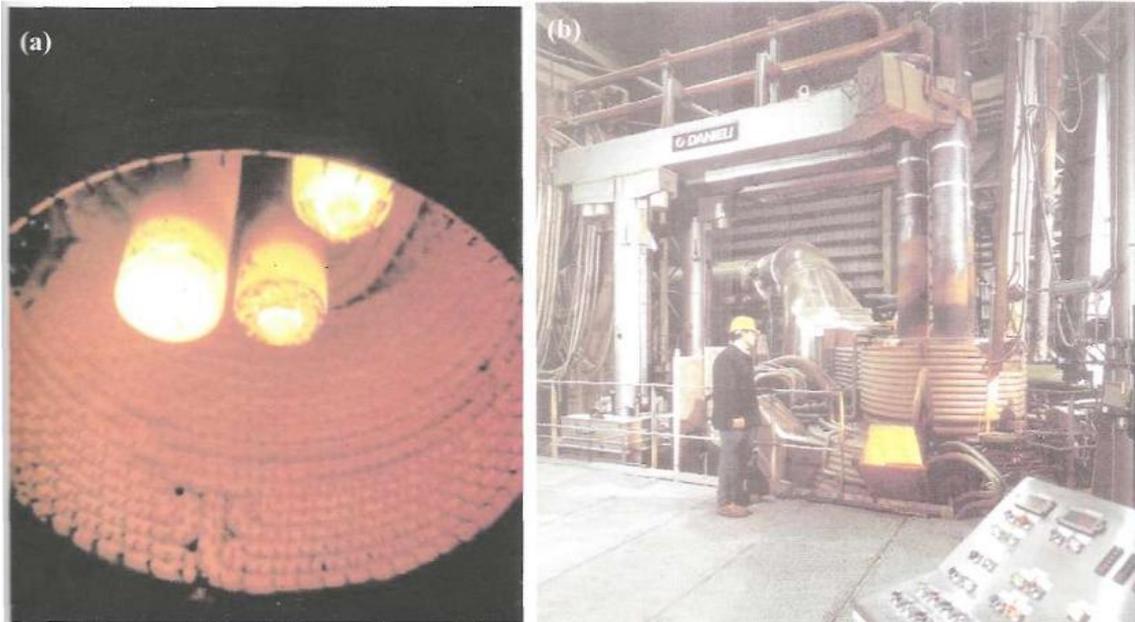


Ilustração 4 - Estações do tipo forno panela (a) e (b). Fonte: RIBEIRO, 1996 .

O forno panela é um equipamento cujas características propiciam a execução de uma série de operações como, por exemplo:

- controle da temperatura;
- ajuste da composição química;
- desoxidação;
- dessulfuração;
- homogeneização de composição química e temperatura.

Segundo Ribeiro e Sampaio (1996), de forma geral, a seqüência de operações normalmente utilizada é apresentada pelo fluxograma da Ilustração 5:

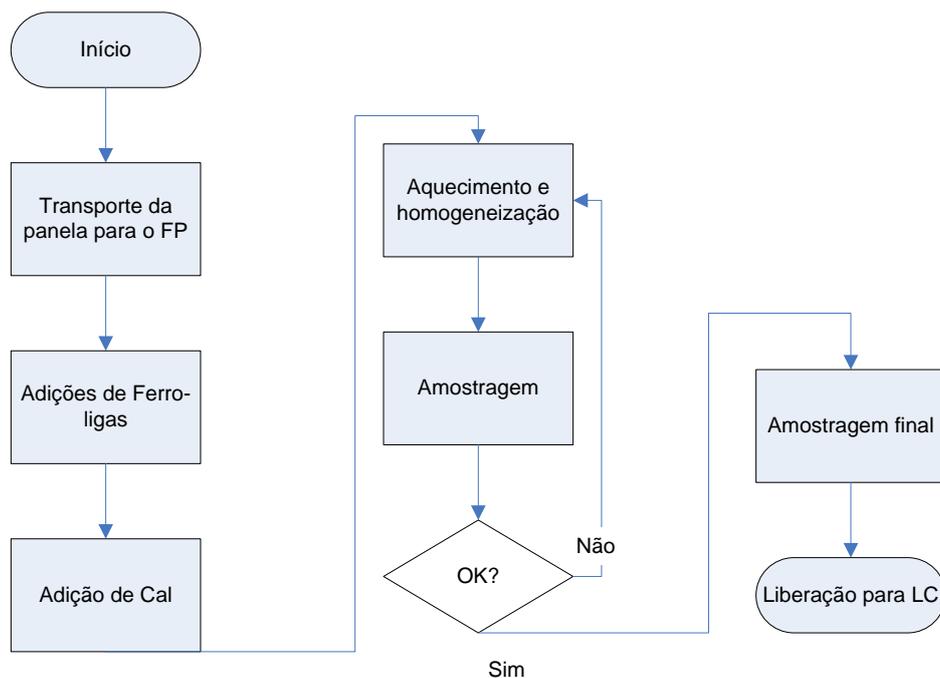


Ilustração 5 - Fluxograma das operações no FP.

- A panela contendo o aço líquido proveniente do forno de refino primário é transportada para o Forno-panela;
- São feitas as adições de ferros-ligas ou metais puros para correção da composição química, com base na amostra retirada após o vazamento;
- A desoxidação pelo silício e/ou alumínio pode ser efetuada;
- É também necessário adicionar cal ou escória sintética para adequar o volume de escória na panela, impedindo a exposição do arco elétrico durante o aquecimento;
- No caso da elaboração de aços com maiores exigências de qualidade, é imprescindível que a escória do tratamento seja propícia à captação de inclusões e/ou dessulfuração do aço, tornando-se necessário remover a escória remanescente (através de raspagem) vinda do vazamento do forno primário, substituindo-a por outra escória mais adequada;
- O forno é ligado para o primeiro aquecimento e a tendência de queda acentuada da temperatura, provocada pela realização das adições, se reverte. Entretanto, a panela ainda não teve o encharque térmico adequado e a taxa de aquecimento global do aço líquido varia de 1,5 a 2,5°C/minuto (embora nos últimos minutos possam ser alcançadas taxas de 3 a 4°C/minuto). O tempo de forno ligado pode variar de 10 a 15

minutos, normalmente não excedendo este limite. Isto se deve ao fato de que a temperatura da escória é continuamente elevada, podendo prejudicar o revestimento da linha de escória da panela e da abóbada do forno. Observa-se que no caso de remoção da escória, ocorre uma maior queda de temperatura, sendo, portanto, necessário aquecer o aço por um período maior;

- Após estes tratamentos iniciais, realiza-se uma amostragem do aço (temperatura e composição química) e processa-se a desoxidação, caso ainda não tenha sido efetuada, e as adições corretivas de ligas;
- Em seguida, inicia-se o segundo aquecimento cujo tempo é calculado com base na temperatura final objetivada. Nesta fase, o incremento de temperatura é constante e dependendo da potência empregada, pode atingir de 3,5 a 6°C/minuto;
- Caso seja necessário um pequeno acerto na composição química, o aquecimento pode ser interrompido ou as adições podem ser feitas com o forno ligado, dependendo do elemento químico a ser corrigido;
- Para concluir o processo, retira-se uma amostra final e o aço é liberado para o lingotamento ou para a complementação do tratamento em outros equipamentos de refino secundário, se não forem necessárias novas correções.

O tempo total de tratamento em fornos panela varia de 30 a 70 minutos, dependendo das operações necessárias. Por exemplo, a utilização de dispositivos que minimizem a passagem de escória do forno primário para a panela, evita a operação de raspagem da escória remanescente e a perda de temperatura é reduzida.

5. A PANELA DE AÇO

A panela é o equipamento utilizado para transportar o aço líquido do forno de fusão ao lingotamento contínuo.

Com a introdução do forno-panela no circuito de transporte, o tempo de permanência do aço líquido na panela aumentou, e as solicitações térmicas e químicas também aumentaram, pois o refino do aço (operações realizadas para acerto de composição química e temperatura) que era executado no forno, passou a ser executado na panela (VATAVUK, P. 1989).

Este equipamento é composto de duas partes bem distintas:

- Parte Metálica;
- Parte Refratária e Isolante.

5.1 PARTE METÁLICA

A parte metálica é composta de chapas soldadas, onde são fixados rigidamente os munhões, que são os elementos de apoio, ou utilizados para serem engatados os travessões, que servem como elemento de ligação entre a ponte rolante (transportadora) e a panela.

Os munhões da panela são um dos pontos críticos da sua estrutura metálica, são os pontos de içamento pela ponte rolante, por isso, é necessário mantê-los limpos de escória e aço aderidos durante o processo. Pode-se representar esquematicamente a parte metálica de uma panela de aço de acordo com a Ilustração 6.

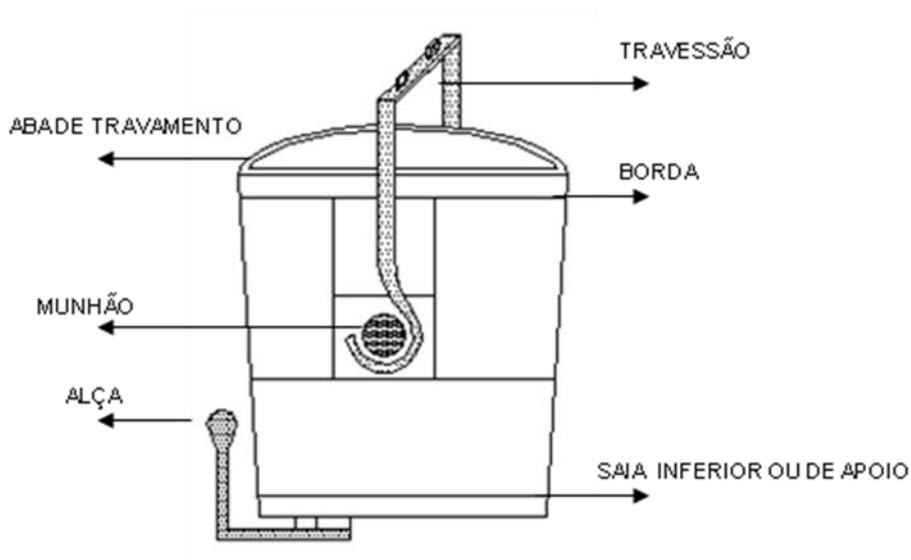


Ilustração 6 - Desenho esquemático da parte metálica de uma panela de aço. Fonte: VATAVUK, 1989.

5.2 PARTE REFROTÁRIA E ISOLANTE

Formada por materiais que apresentam elevada estabilidade física e química a altas temperaturas, isto é, que resistam às solicitações térmicas, mecânicas e químicas, decorrentes por exemplo dos constantes choques térmicos, solicitações ocasionadas durante o processamento da corrida, seja pelos impactos de aço durante o vazamento, como pela movimentação do aço dentro da panela e decorrentes das reações químicas entre os refratários e os mais diversos tipos de aço, respectivamente.

5.2.1 Principais regiões de um revestimento e tipos de refratários

Para melhor compreensão dos mecanismos de desgaste dos refratários em uma panela, faz-se necessário dividir o revestimento em regiões, já que diferentes mecanismos ocorrem nessas diversas regiões, obrigando o uso de diferentes qualidades de refratários. O objetivo do revestimento refratário é sempre o aumento da campanha (vida útil do revestimento) com o menor custo

específico (R\$/t de aço), devido a isso busca-se nas especificações dos refratários um balanceamento de qualidades que permita a obtenção de campanhas com a menor quantidade de interrupções intermediárias para reparo.

Dentro desse conceito, são usados diferentes tipos de refratários nas diversas regiões da panela de aço, levando em consideração as taxas de desgaste apresentadas pelas mesmas. Dentre essas regiões as mais críticas são a linha de escória, região de impacto do jato de aço durante os vazamentos, e a região das sedes de plug e válvula, dando uma atenção especial a sede de plug (região de rinsagem). Em aciarias elétricas atualmente predomina o uso dos materiais básicos nos revestimentos das panelas, função exclusiva das condições das escórias básicas adotadas, que via de regra precisa apresentar qualidade adequada a prática de dessulfuração, e da exigência da limpeza dos aços fabricados.

Os refratários de dolomita, magnesianos, e magnésia-carbono são atualmente os mais empregados. Evidentemente que a decisão pelos diferentes tipos de refratários existentes nessas classes, deverão ser escolhidos a partir dos resultados alcançados, ou seja, qualidades mais nobres deverão proporcionar campanhas mais longas, afim de compensar o custo específico final.

Os refratários de alta alumina são empregados nas sedes, plugs de capilaridade direta, fechamento de bordas superiores, revestimentos de segurança, ou seja, em pequena extensão nos revestimentos. Em algumas aciarias os refratários de alumina-carbono têm sido utilizados para resolver problemas de regiões de impacto.

Pode-se apresentar a organização e a divisão dos diversos tipos de refratários em uma panela de aço com a Ilustração 7.

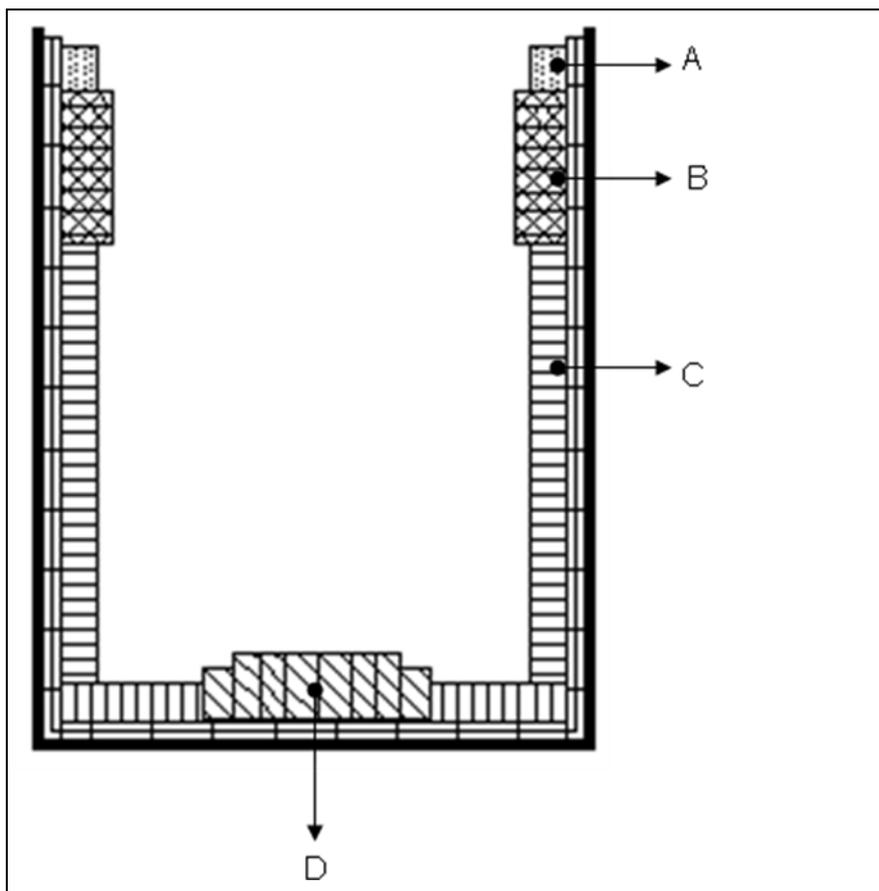


Ilustração 7 - Desenho esquemático das regiões do revestimento refratário das painéis de aço.
Fonte: PEREIRA, 1986.

Onde:

A – Borda Livre;

B – Linha de Escória;

C – Linha de Metal;

D – Fundo.

5.2.1.1 Borda Livre

É a região que fica acima da linha de escória até a borda superior da, também conhecida por sobrelinha. A altura da mesma varia nas diversas Aciarias, e tem como principais finalidades evitar transbordamentos de escória provenientes de variações acentuadas na quantidade de aço e/ou escórias vazadas, ou mesmo provocadas por oscilações do nível de escória oriundas

dos deslocamentos da panela, além de evitar que as projeções de escória, provenientes dos processos de forno panela.

Como a sobrelinha não foi projetada para entrar em contato constante com a escória e muito menos com o aço, utilizam-se tijolos de menor qualidade e menor custo.

Um dos principais problemas desta região é o acúmulo de escória proveniente das projeções de aço que vão se acumulando corrida a corrida chegando a ponto de formarem uma casca que fecha a parte superior da panela. Devido a isso, a panela precisa ser limpa e a escória deve ser removida após cada corrida, para evitar a ocorrência desta anomalia.

Em muitas Aciarias, é colocada uma tampa sobre a panela, durante o lingotamento, para evitar perdas térmicas. O assentamento da tampa pode ser prejudicado, devido aos problemas de projeções de aço e escória na borda da panela.

5.2.1.2 Linha de escória

A linha de escória é a região do refratário de serviço localizada no plano de contato entre escória e aço, conforme pode ser observado na Figura 6.

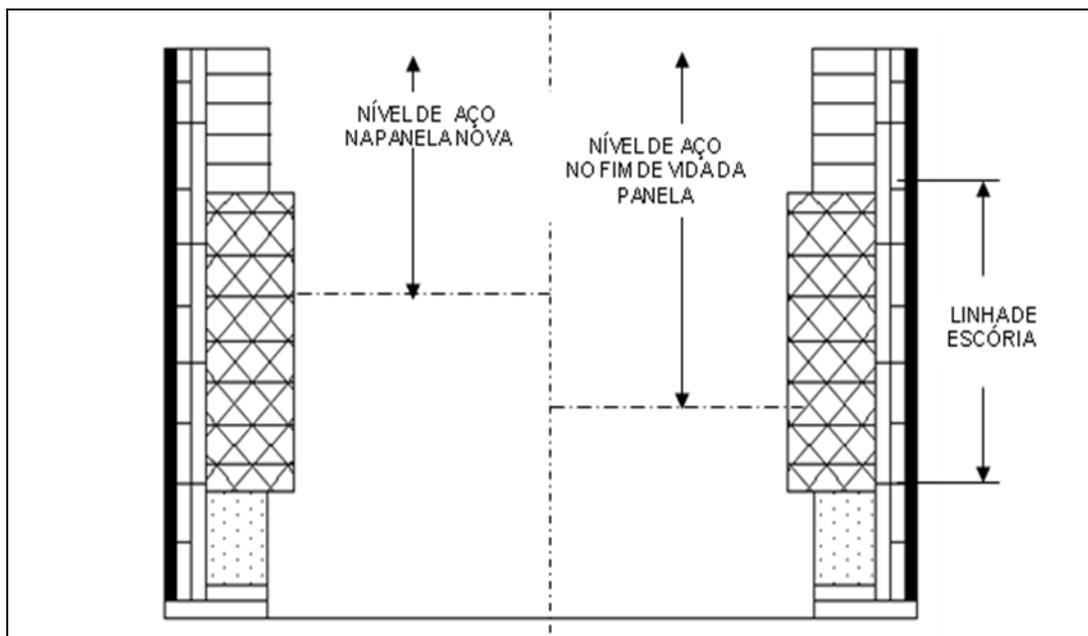


Ilustração 8 - Desenho esquemático da linha de escória de uma panela de aço. Fonte: PEREIRA, 1986.

A altura (número de fiadas) da linha de escória é determinada basicamente pelo desgaste da panela e pelas variações nas quantidades de aço e escória vazadas pelo forno de fusão.

O desgaste da panela como um todo provoca a redução da altura de aço e escória dentro da panela, pois a panela aumenta seu volume útil, e as variações das quantidades de aço e escória vazadas pelo forno de fusão podem variar em função dos cuidados e instrumentos de controle existentes no forno como o canal EBT, balanças de vazamento, lastro líquido do forno, pesagem de cal e sucata.

5.2.1.3 Linha de metal

Parede ou linha de metal é a parte em que o material que reveste as laterais da panela permanecerá mais tempo em contato com o aço. Normalmente é a região da panela onde se registra o menor desgaste, desde que seja respeitado o contato com o aço líquido, já que os refratários da parede

são projetados para resistir somente o ataque do aço e não da escória líquida, que normalmente é utilizada nos processos de fabricação.

5.2.1.4 Fundo

Como o nome indica, são refratários que constituem o fundo da panela, que pode ser livre ou preso conforme as Ilustrações 9 e 10 respectivamente.



Ilustração 9 - Desenho esquemático de panela com fundo livre. Fonte: OLIVEIRA, 1997.

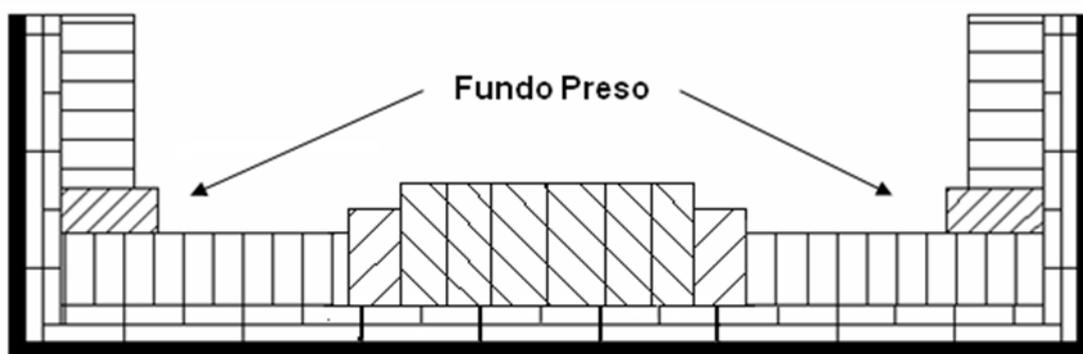


Ilustração 10 - Desenho esquemático de panela com fundo preso. Fonte: OLIVEIRA, 1997.

Um fundo é caracterizado livre quando o fechamento entre tijolos do fundo da panela e a parede é feita por concreto refratário ou massa de socagem, e é classificado como preso quando a área coberta por tijolos abrange todo o fundo da panela sendo a parede montada sobre ele. É nesta zona que se localiza a chamada zona de impacto.

5.2.1.5 Zona de Impacto

É a região do fundo da panela (Ilustração 11) que recebe o impacto do jato quando do início do vazamento do forno, provocando um forte esforço mecânico de erosão sobre estes materiais. Como consequência, apresenta um desgaste acentuado.

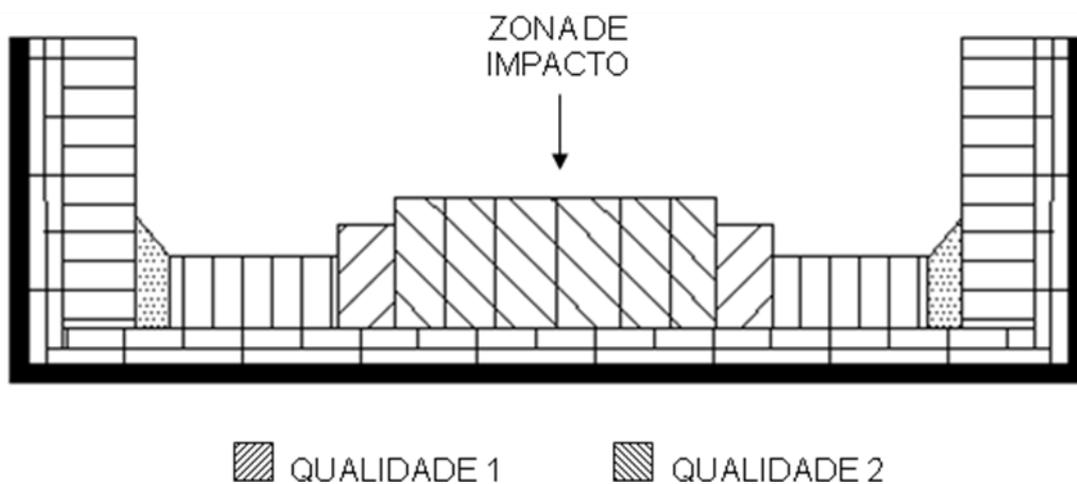


Ilustração 11 - Variação de altura e qualidade dos tijolos do fundo livre de uma panela. Fonte: OLIVEIRA, 1997.

6. CICLO DE PANELAS

O ciclo de uma panela de aciaria é composto por uma seqüência de operações que podem ser agrupadas em duas etapas. A primeira consiste no período em que a panela contém o aço líquido (panela cheia). A segunda se refere ao período em que a panela permanece vazia, aguardando o vazamento da próxima corrida. Os períodos de vazamento do aço para a panela e de lingotamento são compostos de ambas as etapas descritas abaixo.

O período de tempo com aço pode ser dividido em:

- Tempos de transporte de panela cheia;
- Tempo de tratamento no forno panela.

Já o período de tempo sem aço pode ser sub-dividido em:

- Tempos de transporte sem aço;
- Tempo de manutenção refratária;
- Tempo de aquecimento;
- Tempo de espera para vazamento.

Os tempos de vazamento e lingotamento podem ser considerados como tempos mistos, panela cheia e panela vazia, como pode ser observado na Ilustração 12.

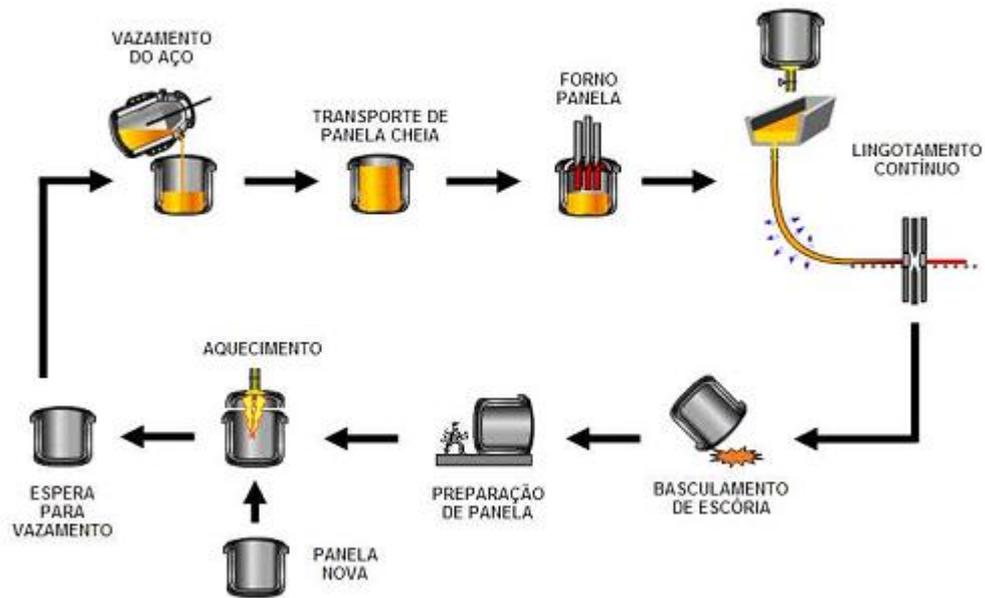


Ilustração 12 - Desenho esquemático dos ciclos de produção e de panelas. Fonte: RIBEIRO, 1996.

7. FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESGASTE

A necessidade de busca de melhoria na vida útil do refratário de panelas de aço, bem como a redução do número de ocorrências negativas no perfil de desgaste refratário ao longo da campanha objetivando a produção do aço com maior segurança operacional só pode ser controlada a partir do momento em que se conheçam os mecanismos de desgaste dos refratários, pois isso é primordial na busca das reduções dos consumos específicos. Identificar e compreender os mecanismos presentes é etapa crítica na busca de solução de problemas com desempenho de refratários (CASSETTE, W.Q., 2000).

Felizmente os principais mecanismos podem ser distribuídos em três grandes grupos: térmico, químico e mecânico, sendo os dois primeiros o objeto de estudo do presente trabalho.

7.1 FATORES TÉRMICOS

7.1.1 Pré-aquecimento da panela

Por muito tempo os efeitos do aquecimento de panelas de aço foram discutidos, e os autores ressaltam a relevância da condição térmica dos revestimentos refratários no controle da temperatura do aço e discutem a importância da etapa de aquecimento de panelas no desempenho dos tijolos refratários. Conforme citam, os revestimentos refratários, principalmente aqueles utilizados na linha de escória das panelas de aço, apresentam elevados teores de carbono. O carbono, além de conferir resistência ao tijolo, promove sua impermeabilização, dificultando o ataque da escória. Durante o aquecimento das panelas ocorre a oxidação do carbono devido às altas temperaturas dos gases da queima e à presença de oxigênio. A oxidação do carbono leva a um decréscimo da resistência mecânica do material, podendo causar uma redução sensível na vida útil dos refratários de trabalho.

A quantidade de calor necessária para se aquecer um revestimento refratário é função direta do calor específico do refratário utilizado, da temperatura de face quente desejada e do peso do revestimento. Também dependerá do tempo que os refratários necessitarão para se alcançar as curvas de temperatura em regime permanente de condução de calor.

A energia acumulada pela panela durante o aquecimento, depende fortemente da temperatura da chama, que pode ser alterada através da regulação do aquecedor.

Na Ilustração 13, temos um gráfico que mostra como a temperatura de chama influencia a energia acumulada nas paredes, ao longo do tempo de aquecimento.

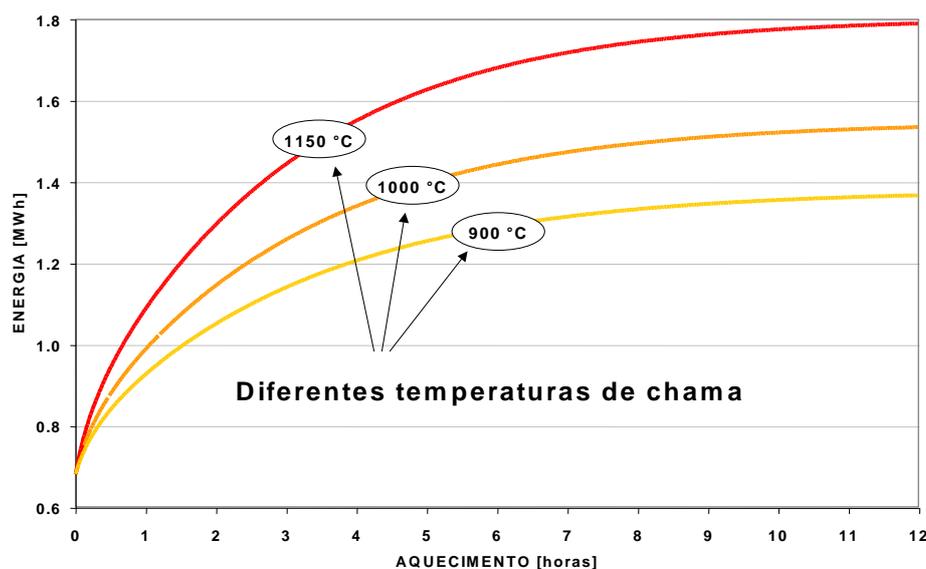


Ilustração 13 – Energia acumulada nas paredes refratárias de uma panela para diferentes temperaturas de chama do aquecedor. Fonte: TETRAULT, 2004.

Através de modelamento da transferência de calor transiente em 3 dimensões, Tetrault *et al* (2004) comparou o comportamento da temperatura do aço e do revestimento refratário durante os períodos de tratamento e espera com panela cheia para três diferentes condições de pré-aquecimento. Os resultados são apresentados na Ilustração 14 (a) e (b). Nota-se que maiores temperaturas de chama, durante a etapa de pré-aquecimento,

implicam em temperaturas mais altas do refratário e conseqüentemente, do aço líquido após o vazamento.

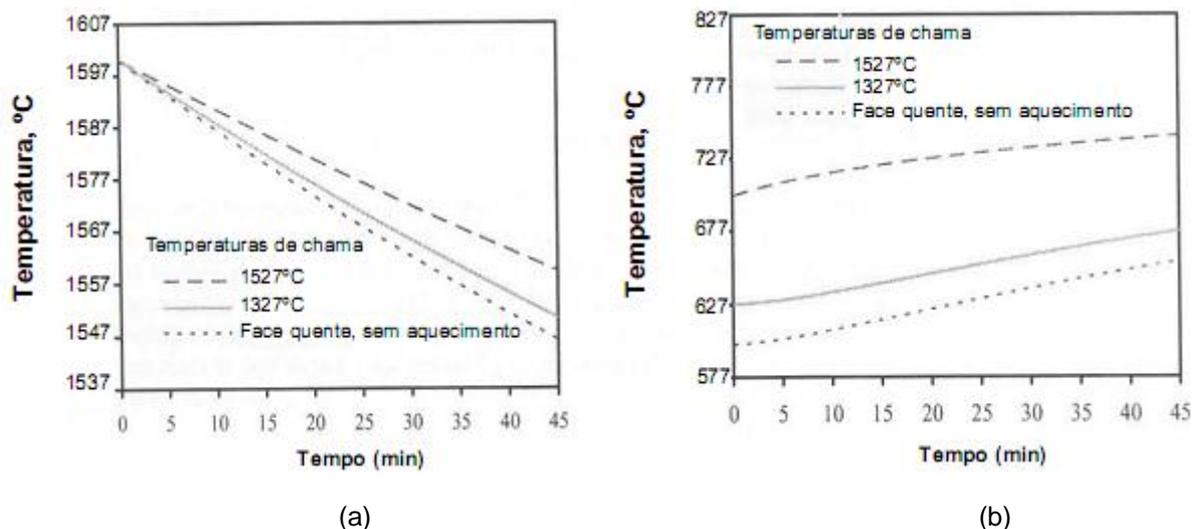


Ilustração 14 - Comportamento da temperatura do aço (a) e do revestimento refratário (b) durante o período de espera para diferentes condições de pré aquecimento. Fonte: TETRAULT, 2004.

Perkins *et al* (1986), também consideram que um pré-aquecimento efetivo do revestimento refratário da panela pode reduzir sensivelmente a temperatura de vazamento necessária do refino primário. Os autores, através de modelamento matemático e testes na planta, estudaram diversas condições de pré-aquecimento das panelas refratárias. Ao final deste estudo, foi possível a definição de regras de pré-aquecimento para as panelas. Da mesma forma, Omotani *et al* (1983) também defendem que o pré-aquecimento resulta em uma significativa redução na queda de temperatura do aço na panela.

1.1 7.1.2 Espera para o vazamento

Após o aquecimento da panela nova, existe um tempo de resfriamento até o recebimento do aço da primeira corrida da panela. A esse tempo de resfriamento chamamos de espera para o vazamento. Essa etapa se caracteriza por apresentar perdas térmicas muito elevadas, devido às altas

temperaturas das paredes refratárias. Lembrar que, quanto maior a altura do salto, maior será o impacto na queda. Da mesma forma, quanto mais quente estiver a panela, maiores serão as perdas.

7.1.3 Índice de encharque das panelas (IE)

Sabe-se que a panela ganha temperatura (ou energia) ao ser aquecida. Também sabe-se que, ao resfriar, está ocorrendo a saída de temperatura da panela. Além disso, muitas vezes pode-se dizer que uma panela está mais encharcada do que outra. Então, para facilitar o entendimento do ciclo térmico das panelas, referencia-se o encharque das panelas através a um número simples, o Índice de Encharque das panelas (IE) (Ilustração 15).

1.2

1.3 *O IE é uma forma de representar a medida da energia contida dentro das paredes refratárias das panelas. Para ter-se uma idéia de valores, uma panela para 50 toneladas de aço deve conter aproximadamente 1,8 MWh de energia armazenada no instante do vazamento. É uma quantidade apreciável de energia e deve-se esforçar para que esse valor seja o maior possível, com pouca variação segundo Ferreira, N.F. et al (1999).*

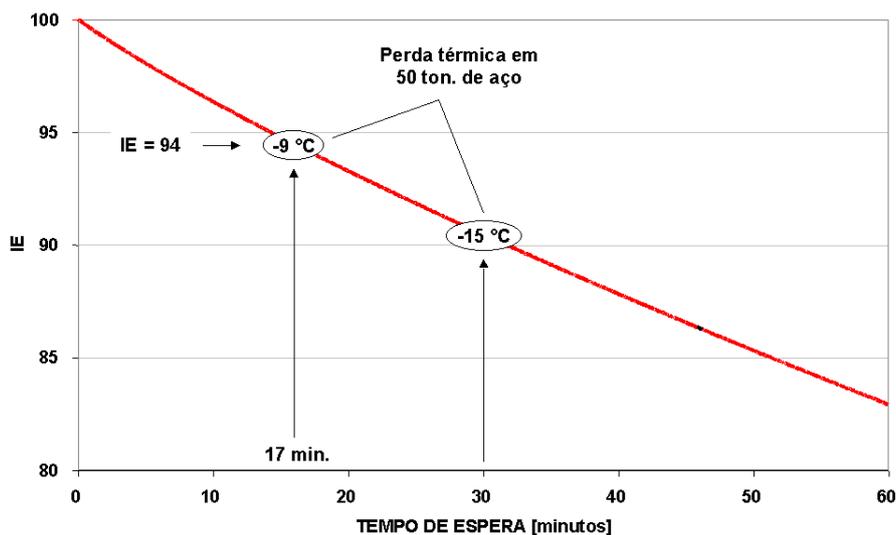


Ilustração 15 – Índice de encharque durante a espera para o vazamento. Fonte: FERREIRA, 1999.

1.4 7.1.4 Período com Aço

1.5

1.6 Ao entrar no ciclo, a panela nova recebe uma quantidade muito grande de temperatura do aço líquido, fazendo com que o seu IE aumente sensivelmente. A Ilustração 16 mostra o IE de uma panela nova, durante o aquecimento, com os três primeiros ciclos com aço. Percebe-se que o IE, no instante do vazamento é menor na primeira corrida do que na segunda em diante. Isso ocorre porque a partir do segundo ciclo, a panela atinge equilíbrio térmico. Assim, existem maiores perdas do aço para a panela no primeiro ciclo.

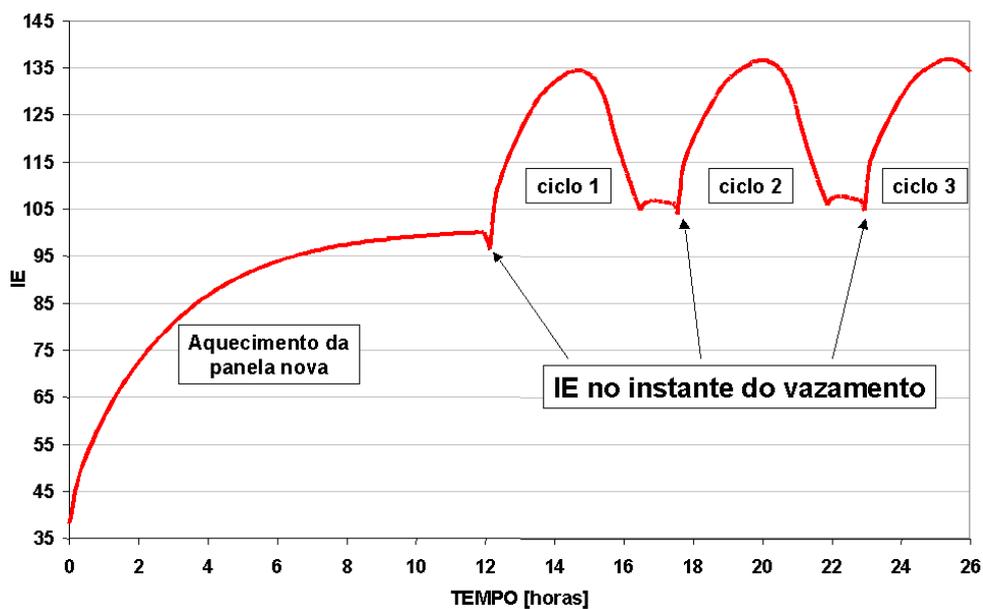


Ilustração 16 – Índice de encharque durante os três primeiros ciclos de uma panela nova. Fonte: FERREIRA, 1999.

Uma vez que a panela esteja no ciclo, o IE passa a ter o comportamento parecido com o mostrado na Ilustração 17.

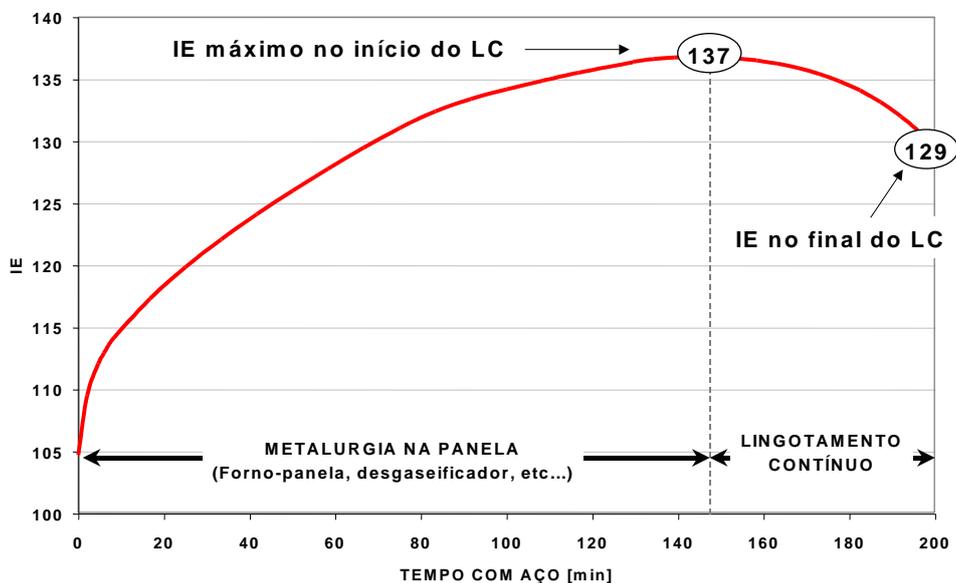


Ilustração 17 – Índice de encharque de uma panela durante o tempo com aço. Fonte: FERREIRA, 1999.

7.1.5 Face quente

Os revestimentos refratários das placas de aço, normalmente estão sujeitos a ação do calor em um lado preferencial, o que se chama de face quente, sendo esta a região exposta à maior temperatura no revestimento. Os materiais refratários expostos à face quente, geralmente desgastam-se mais rápido por estarem em constante contato com o calor excessivo, apresentando trincas e eventualmente lascamentos, expondo novas superfícies a tais condições. Em uma mesma camada de revestimento pode encontrar diferenças de temperaturas elevadíssimas entre a face quente e a face fria, variando de 80 °C a 700 °C.

Isto se deve a condutibilidade térmica do material empregado na composição dos refratários. E é justamente esta resistência na transmitância do calor que contribui para o surgimento de trincas e/ou lascamentos. Por outro lado, variações bruscas de temperatura resultam em gradientes térmicos não uniformes que, quando presentes geram fortes tensões térmicas caracterizando o choque térmico.

7.1.6 Resistência ao choque térmico (RCT)

A RCT, apresentada no quadro da Ilustração 18, depende da condutibilidade térmica, peso específico, calor específico, expansão térmica, módulo de ruptura e do módulo de Young do refratário.

Tipos de Refratários	Taxas de Aquecimento Seguras - °C/h.	Índice de RCT
Dolomítico	85	0,43
Cromo-magnésiano	100	0,41
Magnésiano	195	0,66
MgO-5%C	490	1,76
Alta-alumina	590	2,09
MgO-20%C	3700	13,0

Ilustração 18 – Comparação de resistência ao choque térmico entre classes de refratários.

Fonte: CASSETE, 2000.

Quanto mais adequado for o aquecimento do revestimento refratário, menor a diferença de temperatura entre face quente e face fria e que quanto mais próxima for a temperatura do revestimento e a do metal líquido a ser transportado, menor serão os desgastes causados pelas tensões térmicas.

7.1.7 Controle do arco elétrico

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.

Para se obter um controle do arco elétrico que satisfaça as condições de mínimo desgaste para o revestimento refratário, os arcos elétricos devem estar eletricamente balanceados e as colunas de eletrodos adequadamente alinhadas para evitar que desgastes acentuados sejam provocados pelo mesmo.

A temperatura do arco elétrico está acima de 4500 °C e pode rapidamente fundir qualquer tipo de refratário.

Se os arcos não estão balanceados eletricamente ou fisicamente desalinhados, podem causar exposição de um certo ponto do revestimento

refratário da linha de escória à excesso de temperatura causando seu desgaste prematuro.

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, sério desgaste que pode ser causado se o arco é longo e não está coberto pela camada de escória da panela.

A quantidade de escória a ser adotada, com o objetivo de proteção do arco pode ser definida pela Equação 2:

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

Onde:

$\pi = 3,14$;

R = raio interno do revestimento;

L = comprimento do lado reto da carcaça;

D = altura de escória;

$\rho_{\text{escória}}$ = densidade da escória.

O comprimento do arco elétrico (L_{arc}) deve variar entre 40 e 80 mm respeitando a relação em que a altura da linha de escória (H_e) deve ser maior que o comprimento do arco (Equação 3):

$$H_e = 1,1 * L_{\text{arc}} \quad (3)$$

Onde:

H_e = altura de escória;

L_{arc} = comprimento do arco.

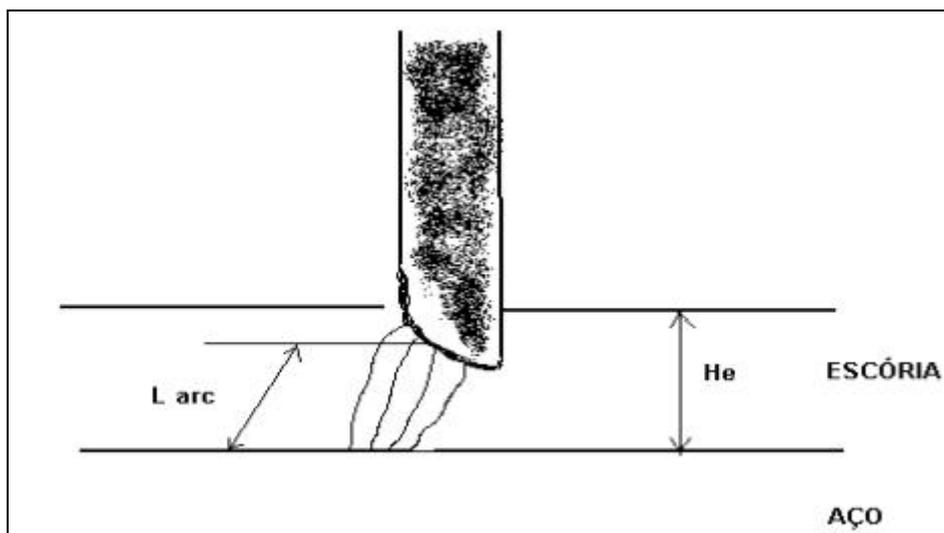


Ilustração 19 - Comprimento do arco elétrico X Altura da linha de escória. Fonte: CASSÉTE, 2000.

7.2 FATORES QUÍMICOS

A especificação do revestimento refratário deve levar em consideração a composição química do aço e principalmente da escória. No que se refere à escória é muito importante que os componentes do tijolo sejam os mesmos.

A composição química dos tijolos refratários é uma propriedade muito importante, para entendimento dos ataques por ação de escórias. A compatibilidade química entre os refratários e a escória é a regra número um para se evitar acidentes.

Além das reações conhecidas entre escórias e refratários (assunto tratado adiante) as reações também podem ocorrer entre refratários em contato de diferentes composições, esse fenômeno é chamado reação de contato, na qual toda atenção deve ser dada a fim de evitar surpresas indesejáveis, nos revestimentos operados principalmente acima de 1600 °C.

Os refratários, em relação à sua composição química, podem ser divididos em 3 grandes grupos (Ilustração 20), se colocados em contato, apresentam a possibilidade de reagirem entre si, a elevadas temperaturas:

GRUPO ÁCIDO	GRUPO BÁSICO	GRUPO INERTE
Sílica Fundida - 99% SiO ₂ Tijolos Sílica - 94-97% SiO ₂ Tijolos de Silicato Zircônia Refratários de Zircônia	Tijolos dolomita Tijolos MgO Tijolos MgO-C Tijolos Cromo-MgO Tijolos Forsterita	Tijolos de carbono Tijolos alta-alumina Tijolos cromíticos

Ilustração 20 – Grupos de refratários. Fonte: CASSÉTE, 2000.

Um dos principais fatores que determinam a performance do revestimento refratário, é sem dúvida, o controle da escória. O controle da escória abrange os fatores análise química, fluidez, turbulência, temperatura e tempo.

Esse mecanismo de desgaste basicamente é regido por dois fenômenos: Penetração e Dissolução.

A penetração é função do raio médio dos poros do refratário, da viscosidade da escória e da molhabilidade da escória em relação ao refratário. Para diminuir as agressões por penetração, faz-se necessário aumentar a viscosidade do líquido penetrante, utilizar tijolos com pouca porosidade e garantir a presença de carbono para diminuir a molhabilidade da superfície.

A penetração é regida pela capilaridade e pela molhabilidade, assim, pode-se observar no quadro da Ilustração 21 um resumo de como pode ocorrer a penetração de um líquido em um meio sólido no caso de revestimentos refratários.

Característica Microestrutural	Taxa de Penetração	Extensão da Penetração	Penetração Conseqüências
Juntas abertas, gaps e trincas	Muito rápida	Profunda	Infiltração de líquido
Porosidade aberta	Rápida	Moderada-progressiva	Infiltração de líquido
Contornos não ligados	Rápida	Local	Infiltração de líquido
Ligante químico ou matriz	Moderada	Progressiva	Perda da ligação
Impurezas segregadas	Moderada	Progressiva	Perda de ligação
Fases ligantes	Baixa	Face quente	Perda de ligação
Contorno de grão	Muito baixa	Face quente	Perda de ligação
Cristal	Baixíssima	Face quente	Dissolução

Ilustração 21 – Características do fenômeno de penetração de um líquido em um meio sólido. Fonte: CASSÉTE, 2000.

A dissolução é um fenômeno de superfície, sendo dirigido pelas diferenças de potencial químico do principal componente de um refratário em contato com um meio líquido que apresenta certa concentração menor que o valor de saturação. A diferença em concentração constitui a força motriz no processo de dissolução. Os movimentos de convecção (agitação do banho) renovam constantemente o líquido em contato com a superfície do tijolo, acelerando o fluxo de massa do tijolo para o líquido. Pode-se diminuir o desgaste promovido por dissolução estabelecendo um controle sobre a composição, temperatura, viscosidade e tensão superficial da escória.

7.2.1 Escória

As principais funções da escória no forno panela são cobrir o arco elétrico e proteger o revestimento refratário da ação da escória; melhorar qualidade do aço através a absorção dos óxidos oriundos da desoxidação (SiO_2 , Al_2O_3) e inclusões (limpeza do aço), dessulfuração, proteger o metal de reoxidação, proteger o aço de absorção de nitrogênio e hidrogênio, isolamento da superfície do aço, minimizando perda térmica, ser completamente compatível com óxido principal do revestimento refratário.

A composição química das escórias de forno panela depende fundamentalmente da qualidade das escórias primárias nos aspectos de basicidade, saturação em MgO e oxidação, e da quantidade de escória que é deixada passar do forno primário para a panela. O volume de escória passante é uma importante variável e para minimizá-lo pode-se fazer adições extras de fundentes no forno panela para correção da qualidade química dessa escória. Como conseqüência, grandes volumes de escória estarão presentes levando a elevadas taxas de desgaste dos refratários, além de maiores consumos de energia, eletrodo e ligas.

A pré-saturação (Ilustração 22) da escória no principal óxido do refratário pode diminuir as taxas de desgaste do revestimento, alcançando o equilíbrio químico entre ambos. Reduzir o tempo de contato metal-escória/ refratários, diminuir a temperatura da escória e a turbulência do banho também são variáveis importantes e eficazes na diminuição do desgaste do revestimento.

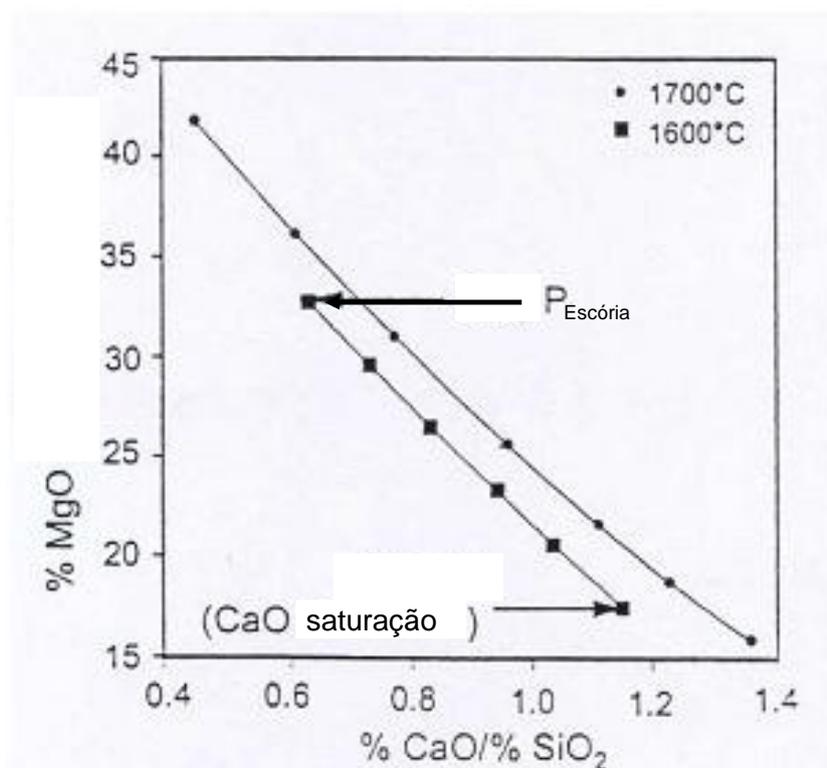


Ilustração 22 - Saturação em MgO para escórias do sistema CaO-MgO-SiO₂ à 1600 °C. Fonte: CASSÉTE, 2000.

7.2.1.1 A Importância da Análise de Escória

Através da análise de escória pode-se elaborar o balanço de materiais do processo, permitindo alterações que reduzam custo de refratários e outros custos de processo.

Primeiramente, deve-se ter todo cuidado quanto a amostragem da escória; deve ser isenta de metálicos e cal não dissolvida e retirada em cada fase do processo onde existe uma mudança no potencial de oxidação alterando a composição da escória. O teor de CaO da escória pode ser o ponto inicial para cálculo do balanço, conforme as Equações 4 e 5.

$$(\text{Peso de cal/carga}) \times (\% \text{CaO na Cal}) = (\text{Peso CaO na escória}) \quad (4)$$

$$(\text{Peso de CaO na escória}) / (\% \text{CaO na escória}) = (\text{Peso de escória}) \quad (5)$$

Determinado o peso da escória pode-se calcular qualquer peso de componente da escória. A quantidade de refratário consumido pode ser obtida porque todo refratário consumido se torna parte da escória.

Normalmente as fontes de MgO na escória são: cal dolomítica e refratários, se este peso de MgO dos fundentes (cal dolomítica, etc...) for subtraído do peso de MgO da escória, o resultado será o peso de MgO dos refratários, conforme as Equações 6 e 7.

$$(\text{Peso de escória}) \times (\% \text{MgO na escória}) = (\text{Peso de MgO na escória}) \quad (6)$$

$$(\text{Peso de MgO na escória}) - (\text{Peso de MgO dos fundentes}) = (\text{Peso de MgO dos refratários}) \quad (7)$$

8. CONCLUSÃO

O conhecimento dos mecanismos de desgaste dos refratários é primordial na busca das reduções dos consumos específicos. Identificar e compreender os mecanismos presentes é etapa crítica na busca de solução de problemas com performance de refratários.

8.1 FATORES TÉRMICOS

Os cuidados e/ou ações de natureza térmica a serem tomados objetivando um maior aproveitamento do revestimento refratário e contribuindo para operação produtiva são inúmeros, sendo listados apenas os principais e de maior expressão no presente trabalho.

Para entrada de um revestimento novo ou vindo de um reparo intermediário em ciclo operacional, é fundamental ter sob controle as técnicas corretas de pré-aquecimento desses revestimentos. Na maioria das aciarias elétricas os tijolos em uso nos revestimentos são de natureza básica e como característica apresentam elevada condutibilidade térmica. Dessa maneira a etapa de pré-aquecimento é fundamental para se evitar a degradação dos refratários por choque térmico nas primeiras corridas, bem como eliminar possibilidade de formação de aço solidificado no interior das painéis. Evidentemente que a manutenção dos refratários em patamares de temperatura de face quente entre 1000°C a 1200°C, é fator muito importante na variável consumo de energia em uma aciaria, assim, pode-se predefinir alguns parâmetros de desgaste e prevenção dos mesmos para tais situações que seriam:

- Revestimentos novos devem ser preferencialmente aquecidos em aquecedores verticais, objetivando uma melhor fixação e acomodação do revestimento durante a dilatação do refratário;
- Estabelecer controle de medida de temperatura da face quente dos refratários como variável de controle do envio das painéis para vazamento;

- Nunca utilizar um revestimento que esteja com temperatura inferior a 1000°C.

Os refratários sobreaquecidos normalmente desgastam-se mais rapidamente, evidentemente não de forma catastrófica, pois somente a porção junto à face quente estará sujeita a temperatura elevada. O que comumente ocorre é que essa área aquecida acima de sua temperatura limite trincar-se-á, podendo lascas expor novas superfícies aos efeitos das temperaturas elevadas. Os fenômenos de trinca e lascamento estão sempre associados a uma temperatura específica ao longo do revestimento, assim, se um produto tem uma resistência mínima a uma dada temperatura, as trincas se desenvolverão nesse ponto onde essa temperatura ocorrer.

Da observação dos gradientes térmicos impostos ao revestimento durante as etapas de aquecimento e resfriamento percebem-se os fortes efeitos de tensão termo-mecânica sobre os refratários. Manter um revestimento o maior tempo possível sem se resfriar é condição básica para se obter altas performances, e assim pode-se listar os seguintes parâmetros que irão ajudar a alcançar os resultados esperados:

- Diminuir ao máximo os tempos de panela vazia no ciclo, dando preferência ao uso de sistemas de válvula gaveta e de rinsagem que necessitem de pouca intervenção para troca de componentes refratários;
- Trabalhe com um número mínimo de panelas em ciclo sem afetar a produtividade da aciaria, ideal de 3 panelas;
- Nos períodos de panela vazia use sempre tampa nas panelas, ou coloque-as nas estações de aquecimento horizontais para minimizar as perdas de calor por convecção para o interior da panela;
- Use sempre tampa nas panelas durante o lingotamento;
- Balanceie os refratários do revestimento de tal forma a minimizar ou mesmo eliminar a necessidade de afastamento da panela do ciclo para reparações intermediárias com resfriamento a temperatura ambiente;
- Avaliar viabilidade de uso de isolamento térmico das carcaças metálicas.

Entre outras coisas, variações bruscas de temperatura implicarão em gradientes térmicos não uniformes, o que contribuirá na geração de fortes tensões térmicas caracterizando o fenômeno de choque térmico. Basicamente a fratura de um refratário é controlada pela resistência a nucleação de trincas e a resistência a sua propagação após nucleada. Para Kreith, F. *et al* (2003) a RCT depende da condutibilidade térmica, peso específico, calor específico, expansão térmica, módulo de ruptura e do módulo de Young do refratário.

Dessa forma, trabalhar em todas as etapas de um ciclo de panela, objetivando eliminar os tempos mortos, e buscando otimizar o número de panelas aquecidas em uso, é muito importante em uma aciaria que esteja buscando baixos valores de consumo de energia e de refratários.

8.2 FATORES QUÍMICOS

Sobre os fatores de natureza química, os principais cuidados e/ou ações a serem tomados objetivando um maior aproveitamento do revestimento refratário e contribuindo para operação produtiva, como já apresentado anteriormente, giram em torno dos fenômenos de penetração e dissolução, tendo como principal vilão o ataque de escórias.

A composição química das escórias de forno panela depende fundamentalmente da qualidade das escórias primárias nos aspectos de basicidade, saturação em MgO e oxidação, e da quantidade de escória que é deixada passar do forno primário para a panela. O volume de escória passante é uma importante variável e todas as medidas para minimizá-lo devem ser tomadas, do contrário adições extras de fundentes deverão ser feitas no forno panela para correção da qualidade química. Como consequência, grandes volumes de escória estarão presentes levando a elevadas taxas de desgaste dos refratários, além de maiores consumos de energia, eletrodo e ligas.

As principais variáveis de controle da qualidade das escórias afim de se obter baixas taxas de desgaste dos refratários são:

- Temperatura “líquidus” cujos valores dependem fundamentalmente da basicidade binária (C/S), e da concentração dos elementos rebaixadores de líquido das escórias – FeO, Al₂O₃, MgO, MnO e CaF₂;
- Controle do índice de saturação dos óxidos MgO e CaO;
- Volume de escória presente no processo, cujas quantidades dependem fundamentalmente do volume de escória que passa do tratamento primário para panela, e do volume das adições feitas durante o processamento no forno-panela;
- Controle do grau de agitação da corrida, pois as frentes de reação escória/refratários são maximizadas com o aumento de agitação metal/escória;
- Tempo de contato escória/refratário, que é função direta do desgaste; quanto maior for, maior será a taxa de desgaste do revestimento;
- Temperatura e aquecimento das escórias, outra função direta do desgaste, quanto maiores seus valores, maiores serão as taxas de corrosão dos refratários.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a confecção de trabalho foram evidenciadas algumas oportunidades em linhas de pesquisa que poderiam ser exploradas e desenvolvidos trabalhos como:

- Controle do perfil de desgaste de linhas de escória em panelas de aço;
- Controle da relação “panela cheia” X “panela vazia” e seus tempos, com foco na redução de perdas de temperatura e sua influência no desgaste de revestimentos refratários em panelas de aço;
- Melhorias e controle no aquecimento de panelas de aço para aciarias elétricas;
- Influência do tempo de espera para vazamento na perda de temperatura e choques térmicos de revestimento refratário de panelas de aço;
- Influência do controle de basicidade de escória na desoxidação do refino secundário e desgaste de revestimento refratário de panelas de aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHRIST, F. S., *et al.* **MELHORIA DOS AQUECEDORES DE PANELA DA GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI.** In: Anais do 30º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Belo Horizonte: 1998.
- CALLISTER JR., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.
- CASSÉTE, W.Q., **REFRATÁRIOS PARA USO EM FORNO PANELA.** In: Anais do Curso de Refratários para Aciaria Elétrica. Belo Horizonte: 2000.
- FERREIRA, N. F., *et al.* **ANÁLISE DE FATORES OPERACIONAIS DE PANELA DA ACIARIA DA GERDAU – AÇOS FINOS PIRATINI UTILIZANDO UM MODELO MATEMÁTICO.** In: Anais do 12º Seminário de Aciaria do IAS, Buenos Aires: 1999.
- FERREIRA, N. F., *et al.* **INFLUÊNCIA DO DESGASTE DE PANEAS SOBRE AS PERDAS TÉRMICAS DO AÇO LÍQUIDO.** In: Anais do 35º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Salvador: 2004.
- KREITH, F., *et al.*, **Princípios de Transferência de Calor.** Sexta Edição. São Paulo: Editora Thomson, 2003.
- OLIVEIRA, S.P., **Escórias e Mecanismos de Desgaste de Refratários para Forno Panela.** Alafar, 1997.
- PEREIRA, C. L., **Modelamento Matemático do Perfil Térmico do Revestimento Refratário de Painéis de Aço.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1986.

- PERKINS, A., *et al.* **Improvements to Liquid Steel Temperature Control in the Ladle and Tundish**. Scaninject IV, Lulea, 2004.
- RIBEIRO, D.B., e Sampaio, R.S., **Refino Secundário dos Aços** – ABM, 1996.
- TETRAULT, C., *et al.* **CFD Analysis of Thermal Behavior of Refractory in Steel Ladle Cycling**. AISTech 2004 Proceedings, Volume I, 2004.
- VATAVUK, P. **INFLUÊNCIA DOS TEMPOS DE ESPERA DE UMA PANELA SOBRE AS PERDAS TÉRMICAS DO AÇO LÍQUIDO**. In: Anais do Seminário de Aciaria, Refratários e Fornos Elétricos, Rio de Janeiro, 1989.