

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MINAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“DESENVOLVIMENTO DE ESCÓRIA SINTÉTICA
SINTERIZADA PARA PRODUÇÃO DE
AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADO (GO)”**

Autor: Adão Adalcio Campos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro

Co-orientadores: Eng. Dr. Pedro José Nolasco Sobrinho

Eng. M.Sc. Hélcio de Araújo Quintão

Eng. M.Sc. Simão Pedro de Oliveira

Belo Horizonte, novembro de 2009.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MINAS**

Adão Adelcio Campos

**“DESENVOLVIMENTO DE ESCÓRIA SINTÉTICA SINTERIZADA PARA
PRODUÇÃO DE AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADO (GO)”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro

Co-orientadores: Eng. Dr. Pedro José Nolasco Sobrinho

Eng. M.Sc. Hércio de Araújo Quintão

Eng. M.Sc. Simão Pedro de Oliveira

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

A Deus essência do meu ser. A minha família Regiane, Jennyfer e Arthur, pelo incentivo e apoio por mais esta importante etapa da minha vida profissional.

Agradecimentos

O autor agradece a todas as pessoas que colaboraram diretas ou indiretamente na elaboração deste trabalho, e em particular:

A ArcelorMittal Inox Brasil, pela confiança e oportunidade de crescimento profissional.

Ao engenheiro Wilian da Silva Labiapari pelo incentivo inicial e principalmente por mostrar-me o caminho para realização deste sonho.

Aos engenheiros Antoine Perroy e Jose Maria Duarte de Moraes, por acreditar e abrir as portas.

Aos Engenheiros Cássio Mitraud Ruas, Edalmo Magalhães de Souza e Carlos Lovato Neto, da gerência de produtos siliciosos, pelo apoio e pela oportunidade.

Ao Engenheiro Hércio de Araújo Quintão, pela amizade, incentivo, apoio, disponibilidade e orientação na elaboração desta dissertação.

Aos Engenheiros José Geraldo Ank e Leomar Marcon, pelo apoio e ajuda em vários momentos.

Ao José Eustáquio Pinto pelo seu apoio e confiança.

Aos técnicos Edilson Simões Cavalieri, Nildomar Soares Ferreira e Anderson Batista Lana, pelos seus apoios incansáveis em cada momento dos experimentos.

À Gerência de Aciaria aços Carbono e Siliciosos (PEAE), representada pelo Engenheiro Otávio Augusto Teixeira e João Domingos G de A. Junior, que juntamente com toda a equipe da Aciaria aços elétricos, acreditaram no projeto, permitiu a realização das corridas experimentais e alcance dos resultados.

Ao professor e orientador Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro, pela sua disponibilidade a mim dedicada, pelas sugestões e críticas neste projeto.

Ao engenheiro Simão de Pedro de Oliveira pelo apoio e orientações.

A empresa Vamtec SA, em nome do seu diretor presidente Gilson Risatto Guermandi por abrir as portas da fábrica, acreditar neste projeto e mesmo nos momentos difíceis, manteve a confiança que chegaríamos ao resultado final objetivado.

Ao engenheiro Pedro José Nolasco Sobrinho e sua equipe do centro de pesquisa da Vamtec SA, participantes ativos na transformação deste projeto em realidade.

A toda equipe do laboratório químico da ArcelorMittal Inox Brasil, pelo apoio nas análises extras de aço e escória das corridas experimentais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Fluxo produtivo na Arcelormittal Inox Brasil.....	4
3.2	Aço silício de grão orientado (GO).....	6
3.3	Qualidade do aço GO	6
3.4	Escória	7
3.4.1	Aspectos estruturais da escória	8
3.4.2	Basicidade da escória	10
3.4.2.1	Basicidade ótica	13
3.4.3	Capacidade de dessulfuração da escória	15
3.4.3.1	Dessulfuração sob vácuo - aspectos cinéticos e termodinâmicos ...	19
3.4.4	Escória do convertedor.....	23
3.4.5	Escória sintética	25
3.4.6	Sinterização de minério de ferro.....	28
3.5	Diagramas de fases	31
3.6	Desgaste do refratário da linha da escória	34
4	MATERIAIS E METODOS	35
4.1	Equipamentos utilizados	35
4.1.1	Panela de aço.....	35
4.1.2	VOD (vacuum oxygen decarburization).....	36
4.1.3	Forno panela	37
4.2	Materiais utilizados.....	38
4.2.1	Escória sintética sinterizada	38
4.2.2	Fundentes e ligas	45
4.2.3	Aço silício de grão orientado	46
4.3	Procedimento experimental	46
4.3.1	Descrição do experimento.....	47
4.3.2	Utilização da escória sintética sinterizada no processo industrial.....	49
4.3.3	Amostragem de escória e aço na panela	52
4.3.4	Preparação da amostra de escória para análise química	53
4.3.5	Preparação da amostra de aço para análise química	54
4.3.6	Análises químicas realizadas	56

4.3.6.1	Análise química no espectrômetro de Raios-X	56
4.3.6.2	Análise química no espectrômetro de emissão ótica	56
4.3.6.3	Análise química por gasometria	57
4.3.6.4	Análise difração de RX.....	57
4.3.7	Análises físicas realizadas	58
4.3.7.1	Teste de tamboramento	58
4.3.7.2	Shatter Test.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	Temperatura durante o processo de sinterização no forno piloto da Vamtec.....	61
5.2	Análise química da escória sintética sinterizada.....	62
5.3	Análise química do aço GO	62
5.4	Análise química Difração-RX	67
5.5	Cálculo termodinâmico da escoria sintética sinterizada	69
5.6	Shatter test.....	72
5.7	Teste de tamboramento	72
5.8	Desgaste do refratário da panela.....	73
6	CONCLUSÕES	75
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
9	BIBLIOGRAFIA	83
10	ANEXOS:	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxo produtivo do aço GO na Aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil.	5
Figura 3.2 - Representação esquemática da dissolução de óxidos metálicos na sílica líquida (SLAG ATLAS, 1981).	9
Figura 3.3 - Classificação dos óxidos presentes na escória (FRUEHAN, 1998).	10
Figura 3.4 – Evolução da basicidade ótica para os óxidos da tabela III.4 (SILVA, 1998).	15
Figura 3.5 - Diagrama ternário Al_2O_3 -CaO-SiO ₂ , 1650°C, mostrando $C_S \times 10^4$	16
Figura 3.6 - Capacidade de sulfeto de varias escórias dos sistemas binários (TURKDOGAN, 1983 apud FRUEHAN,1998).	17
Figura 3.7 - Representação esquemática do efeito da formação da escória e desoxidação sobre a distribuição do enxofre (HOLAPPA,1980).	18
Figura 3.8 - Taxa de dessulfuração e função do Fe_T+MnO (RIBEIRO, 2007).	19
Figura 3.9 - Mecanismo de transferência de enxofre desde o metal até o gás, via escória (RIBEIRO, 2007).	20
Figura 3.10 - Grau de dessulfuração em função do tempo de exposição ao vácuo (RIBEIRO, 2007).	21
Figura 3.11 - Efeito da taxa de vazão de gás no valor de K_S (ASAI,KAWACHI e MUCHI, 1983 apud FRUEHAN, 1998).	22
Figura 3.12 - Relação entre a partição de fósforo e Fe total na escória (NILLES,1982 Apud ATHAYDE,2005).	24
Figura 3.13 - Relação entre %Mn de vazamento e %C para os processos Q-BOP e LD (NILLES,1982 Apud ATHAYDE,2005).	24
Figura 3.14 - representação microestrutural ideal de um sinter de minério de ferro (VIEIRA, et al., 2003).	29
Figura 3.15 – Superfície de equilíbrio entre líquidos e sólidos no diagrama ternário do sistema CaO-SiO ₂ -FeO. (SLAG ATLAS,1995)	32
Figura 3.16 - Diagrama de iso-coeficiente de atividade da sílica, no sistema CaO-SiO ₂ -FeO-MgO a 1600 oC. Fonte: (ELLIOT 1963, apud CARVALHO et al.1977).	33
Figura 4.1 - Painela de aço com revestimento dolomítico.	35
Figura 4.2 - Representação esquemática do VOD (RIZZO, 2006)	36
Figura 4.3 – Esquema do Forno Painela da ArcelorMittal Inox Brasil.	37
Figura 4.4 – Mistura da massa sintética	39
Figura 4.5 – Forno piloto sinterizador da Vamtec S/A.	39

Figura 4.6 – Carvão vegetal.....	40
Figura 4.7 – Ignição do carvão sobre a massa sintética.....	40
Figura 4.8 – Basculamento do forno sinterizador.	41
Figura 4.9 – Remoção da escória sinterizada do forno.	41
Figura 4.10 – Peneiramento da escória.....	42
Figura 4.11 – Escória sinterizada após briquetagem e peneiramento.....	42
Figura 4.12 – Sinterização em escala industrial.	43
Figura 4.13 - Escória bruta após sinterização.....	43
Figura 4.14 – Escória sinterizada, britada e peneirada.....	44
Figura 4.15 – Bag de escória sinterizada pronta para aplicação.....	44
Figura 4.16 - Figura demonstrando o processo de vazamento do aço de um convertedor para a panela (RIZZO, 2006).....	47
Figura 4.17 - Vazamento no convertedor MRPL.....	48
Figura 4.18 – Adição de escória sintética em bag e ponte rolante.	48
Figura 4.19 – Adição de escória sintética em bag e ponte rolante.	49
Figura 4.20 - Sistema de adição na panela via Silo.....	50
Figura 4.21 - Adição da escória, ligas e fundentes através do silo.....	51
Figura 4.22: (a) amostra de escória no momento de sua retirada, (b) amostra segundos depois de sua retirada.....	52
Figura 4.23: Amostra de aço segundos depois de sua retirada.....	52
Figura 4.24 – Máquina de preparação de escória para análise química.	53
Figura 4.25 – Preparação da amostra de escória para análise, onde: (a) antes da preparação e (b) após a preparação.....	54
Figura 4.26-Torno CNC para remoção da camada de oxido da amostra de aço.	55
Figura 4.27 -(a) amostra com a superfície oxidada, (b) amostra preparada no CNC, (c) amostra perfurada para coletas de farpas.....	55
Figura 4.28 - Padrão de inspeção de Queimas, onde: (a) é a aparência queima boa e (b) aparência de queima com indicativo de problema no gás argônio.....	57
Figura 5.1 - Curva de temperatura no processo de sinterização.....	61
Figura 5.2 – Teor de carbono final do aço GO.....	63
Figura 5.3 – Teor de Alumínio final do aço GO.....	65
Figura 5.4 - Comparação entre a escória anterior e a atual.	65
Figura 5.5 – Teor de enxofre final no aço GO.....	66
Figura 5.6 – Teor de enxofre com escória anterior e atual.	66
Figura 5.7 - Consumo de Enxofre no Forno Panela.	67

Figura 5.8 Escória final do processo.....	73
Figura 5.9 –Controle de basicidade binária de escória na panela (CaO/SiO_2).....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Composições típicas de escória de processos siderúrgicos.(SILVA 1998)	8
Tabela III.2 – Indicadores quantitativos dos valores da basicidade da escória mais comuns (SILVA, 1998).....	11
Tabela III.3 – Exemplos típicos para vários índices usados para expressar basicidade (SLAG ATLAS,1995).....	12
Tabela III.4 - Parâmetros e resultados sobre alguns óxidos. SILVA (1998).....	14
Tabela III.5 – Variação do teor final de MgO em escórias do Forno Panela (Barrios 1994)......	34
Tabela IV.1 - Composição química das escórias sintéticas sinterizadas desenvolvidas e testadas.	38
Tabela IV.2 - Composição química dos fundentes.	45
Tabela IV.3 - Composição química das ligas.....	45
Tabela IV.4 – Especificação do aço GO para o produto totalmente processado, testado após recozimento.....	46
Tabela IV.5 - Número de corridas testadas.	46
Tabela IV.6 – Forma de adição da escória na panela.	51
Tabela V.1 - Composição química da escória.	62
Tabela V.2 – Composição química das materiais primas para produção da escória sintética sinterizada.....	64
Tabela V.3 - Dados Difração Raios-X.....	68
Tabela V.4 – Formula combinada do CaO com óxido de Fe e Si.....	68
Tabela V.5 - Resultado Shatter test.....	72
Tabela V.6 - Resultado teste de tamboramento.	72
Tabela V.7 - Resultado análise MgO da escória.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- GO – Aço elétrico de grão orientado
GNO – Aço elétrico de grão não orientado
PTG – Pré-Tratamento de Gusa
FER – Forno Elétrico de Redução
FEA – Forno Elétrico a Arco
AOD-L – Argon Oxygen Decarburization by Lance
MRP-L – Metal Refining Process by Lance
VOD – Vacuum Oxygen Decarburization
Kp – Constante de equilíbrio
R – Constante dos gases
T – Temperatura Kelvin
Dp – Diâmetro da panela (cm)
E – Espessura da escória (cm)
 ρ – Massa específica da escória (g/cm³)
l – Atração íon-oxigênio;
z – Valência do cátion (em módulo);
r – Raio do cátion (Å);
MgO – Óxido de magnésio
ppm – Partes por milhão
SiO₂ – Sílica
 P_{H_2O} – Pressão parcial de água
 P_{H_2} – Pressão parcial de hidrogênio
TiO₂ – Dióxido de titânio
CaO – Óxido de cálcio
Al₂O₃ - Alumina
CaS – Sulfeto de cálcio
MPa – MegaPascal
FeO – Óxido de ferro
FeT – Ferro total
t – tonelada
a – atividade raoultiana
h – atividade henriana

f – Coeficiente de atividade henriana

p – pressão parcial

x – fração molar

μ – média aritmética

C'_s – Capacidade de uma escória absorver o enxofre no equilíbrio escória/ aço;

Q-BOP – (Quick basic oxygen Process)

LD – (Linz e Donawitz)

T – Tesla (Vs/m^2)

RESUMO

Um dos maiores desafios enfrentados durante a produção de aço silício de grão orientado(GO) na aciaria é o controle dos elementos enxofre, alumínio, titânio e fósforo, que influenciam diretamente nas propriedades magnéticas do aço e, conseqüentemente, na eficiência de máquinas elétricas.

Este trabalho focou no desenvolvimento de uma escória sintética sinterizada para adição via silo na panela durante a produção de aço silício de grão orientado(GO) na aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil, que permitisse a obtenção de uma um aço de melhor qualidade. A escória sinterizada foi desenvolvida em parceria com a empresa Vamtec S/A e recebeu o nome de Vamflux RGO SI.

Para o desenvolvimento da escória sinterizada, inicialmente foram produzidas pequenas quantidades de escória no Centro de Pesquisa da Vamtec para caracterização e análise dos resultados. Com os resultados atendendo ao que foi projetado era realizada uma produção maior para testes na aciaria. Nos testes com a escória na aciaria foram retiradas amostras da escória formada e do aço nas várias etapas do processo.

A escória sinterizada possui o CaO quimicamente combinado com o Fe_2O_3 e o SiO_2 para diminuição da propriedade dessulfurante da mesma, o que permitiu a retirada do enxofre da escória sintética.

Os resultados mostraram com a utilização da escória sintética sinterizada que: o risco de sucateamento de corrida devido a aço fora de faixa especificada em enxofre foi completamente eliminado, devido à estabilidade alcançada para o enxofre do aço GO durante a sua produção na aciaria; reduziu-se a perda de temperatura do banho e o consumo de gases inertes injetados na panela para homogeneização do banho; houve redução de cerca de 50% no consumo de ligas à base de enxofre adicionadas no forno panela; redução de aproximadamente 20% no teor de Al do aço, implicando em melhoria da qualidade deste; houve melhor controle da basicidade da escória do processo e do teor de MgO da mesma.

ABSTRACT

It's know that one of the biggest challenges during silicon oriented grain(OG) steelmaking is the control of elements like sulfur, aluminum, titanium and phosphorus because their influence in the steel's magnetic properties. The electric machine efficiency is worse with the increase of theses contaminants elements in the oriented grain steel.

This work had like main aim the development of a sinterized synthetic slag to treat the OG steel in the steel plant of the ArcelorMittal Inox Brasil and increase its quality. Synthetic slag called Vamflux RGO SI was developed together Vamtec S/A, a brazilian partner and producer of goods to iron and steelmaking.

The first steep in the development of the synthetic slag was the production of samples of slags to analysis and definition about their industrial production. Tests with a new slag were performed in the steel plant during GO steel production. Samples of steel and generated slag during tests were withdrawn from ladle in all phases of the process to characterization during steelmaking.

New slag was developed with a special characteristic that is the chemically combination of CaO , Fe_2O_3 and SiO_2 to decrease the desulphurization properties of the slag. Due to fact was possible produce a slag without sulfur in its composition.

The results of this study have shown that with a new slag:

- eliminated risk of loss of run due to sulfur content in the steel;
- decreased of loss temperature of bath and consumption of inert gas injected into ladle to homogeneously of bath;
- occurred the reduction about 50% in the quantity of FeS alloy utilized to adjust sulfur content of steel;
- occurred the reduction in the aluminum content of the steel;
- occurred a much better control of binary basicity of slag and more stability of MgO content.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Centro Brasileiro de Infra-Estrutura (CBIE), poderá faltar energia elétrica em 2009 e 2010 no Brasil, devido à falta de novos projetos para o aumento na produção deste recurso. Segundo a CBIE o Brasil poderá enfrentar uma defasagem de 2% aproximadamente, entre a demanda e a oferta de energia, se a economia do país apresentar taxas de crescimento de 4% a 4,5% ao ano. www.cbie.com.br (2008).

Uma alternativa econômica e interessante, para minimizar a falta de energia, é tornar os equipamentos, com funcionamento a base de energia elétrica, mais otimizados com a utilização de aços elétricos de alta eficiência em máquinas elétricas, tal como o aço elétrico de grão orientado (aço GO), que reduz a perda de energia elétrica e; por consequência, gera uma economia substancial de recursos em toda cadeia de produção.

Vale lembrar que os “aços elétricos” interessam a dois segmentos econômicos onde o Brasil tem engenharia forte: o siderúrgico e o elétrico.

A presença do silício na composição química do aço GO, aliada ao rígido controle de processo em todas as etapas de produção, assegura excelentes propriedades magnéticas, capazes de garantir maior eficiência dos equipamentos elétricos e economia de energia.

Para o aço GO as propriedades magnéticas do produto final são atribuídas à perfeita combinação de todas as etapas dos processos de fabricação. Dentro desta ótica a aciaria é uma das partes essenciais na produção deste aço.

Para garantir as restritas faixas de composição química, aliadas ao baixo índice de contaminação no aço por elementos químicos indesejáveis, como Al, Ti e P, busca-se o menor nível possível de passagem de escória do convertedor para a panela, pois com a adição do silício (aços GO possuem aproximadamente 3% de Si em sua composição química) poderá ocorrer a redução destes elementos indesejáveis da escória oriunda do convertedor e incorporação no aço.

Na panela trabalha-se a formação de uma escória capaz de garantir a proteção térmica do aço durante a sua elaboração, além da capacidade de reter as inclusões.

Para garantir a eficiência da escória, são adicionados na panela, após o vazamento do metal do convertedor, fundentes, como cal cálcica, magnésia e escória sintética, sendo que a escória sintética adicionada deve ter enxofre em sua composição química para diminuir ou evitar sua propriedade dessulfurante, pois o aço GO produzido na ArcelorMittal Inox Brasil tem faixa de enxofre, que deve ser atendida.

Este trabalho visa ao desenvolvimento de uma escória sintética sinterizada com adição via silo, para utilização no processo de fabricação do aço GO, que garanta os requisitos de faixas estreitas de composição química, tais como carbono, enxofre, alumínio, titânio e fósforo.

2 OBJETIVOS

Desenvolver uma escória sintética sinterizada para adição via silo na panela durante o processo de fabricação do aço GO na aciaria.

Permitir um maior estreitamento das especificações da composição química do aço GO para o carbono, enxofre e alumínio.

Fazer uma análise termodinâmica avaliando as condições do processo para a dessulfuração do aço GO utilizando a escória sintética sinterizada.

Avaliar o consumo de ligas Fe-S no forno panela nas duas condições, com a utilização da escória sintética comum e com a escória sintética sinterizada.

Avaliar o comportamento dos elementos Al, C e S no aço GO com utilização da escória sintética sinterizada, comparando-o com a utilização da escória sintética comum.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fluxo produtivo na Arcelormittal Inox Brasil

A então Acesita S.A. fundada em 31 de outubro de 1944, entrou em operação em abril de 1949, com o objetivo de produzir aços especiais para o abastecimento do mercado nacional.

Localizada no município de Timóteo, em Minas Gerais, a usina passou por grandes expansões até atingir a atual capacidade instalada de 915 mil toneladas/ano de aço líquido.

Em 1957 começou o processo de fabricação de aços para fins elétricos no país, tornando-se produtora exclusiva na América Latina dos aços elétricos ou siliciosos de grão orientado-GO e aços elétricos ou siliciosos de grão não-orientado-GNO.

Com a integração mundial, em 29 de maio de 2007, quando ocorreu o lançamento mundial da marca ArcelorMittal na cidade de Cannes (França), a Acesita passa a se chamar ArcelorMittal Inox Brasil, com mudança também da logomarca, que é única para todas as empresas do grupo, no mundo inteiro.

A ArcelorMittal Inox Brasil é constituída dos seguintes equipamentos no processo de elaboração do aço na Aciaria (ver figura 3.1).

- PTG: estação de pré-tratamento de gusa que tem a capacidade de realizar operações como a dessiliciação. Neste processo o teor de silício de gusa é reduzido pela adição de agentes dessilicantes como a carepa. Os tratamentos de dessulfuração e desfosforação do gusa reduzem os teores de enxofre e de fósforo via adição de agentes dessulfurantes e desfosforantes, respectivamente;
- FER: forno elétrico de redução, que produz a liga FeCr utilizada na produção de aços inoxidáveis;
- FEA: forno elétrico a arco, que fundem a sucata e ligas utilizadas na produção de aços inoxidáveis;

- AOD-L: argon oxygen decarburization by lance, convertedor utilizado para a produção somente de aços inoxidáveis;
- MRP-L: metal refining process by lance, convertedor utilizado para a produção de aços carbono, siliciosos e inoxidáveis;
- VOD: vacuum oxygen decarburization são dois fornos que realizam a desgaseificação e descarbonização dos aços carbono, siliciosos e inoxidáveis;
- Forno Panela: forno utilizado para fazer ajustes finos de temperatura e composição química dos aços;
- Lingotamento Contínuo: são duas máquinas de lingotamento de placas dos aços carbono, siliciosos e inoxidáveis.

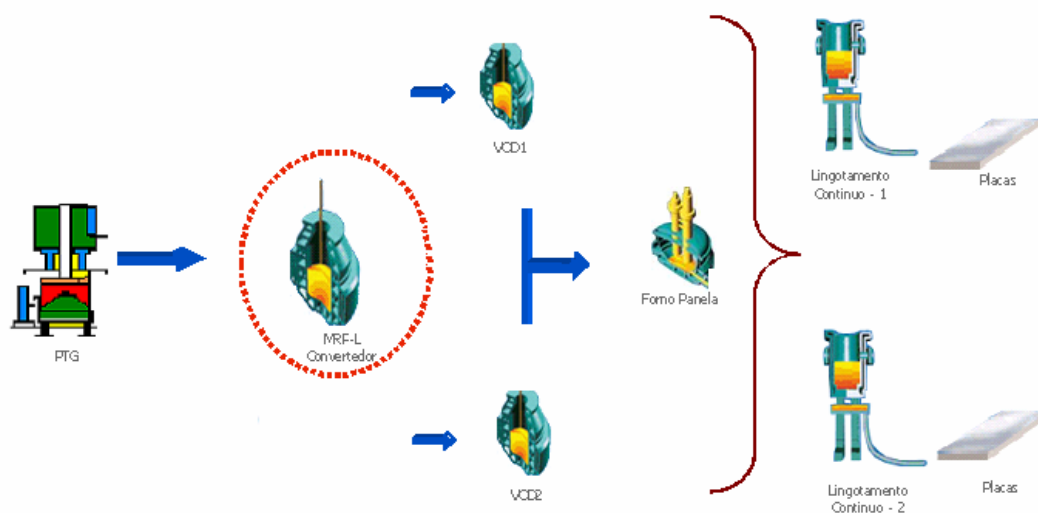


Figura 3.1 - Fluxo produtivo do aço GO na Aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil.

3.2 Aço silício de grão orientado (GO)

A presença do silício na composição química do aço GO, aliada ao rígido controle de processo em todas as etapas de produção, assegura excelentes propriedades magnéticas capazes de garantir maior eficiência dos equipamentos elétricos e economia de energia.

O aço silício GO possui as propriedades magnéticas otimizadas na direção de sua laminação, enquanto o GNO apresenta boas propriedades em qualquer direção considerada.

Os aços elétricos ou siliciosos GO foram desenvolvidos para alcançar baixas perdas magnéticas e elevada permeabilidade magnética. Sua principal característica é apresentar excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação.

São aplicados basicamente na fabricação dos núcleos de transformadores de força e distribuição, sendo também utilizados em reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores.

Para alcançar baixas perdas e elevada permeabilidade magnética o aço GO necessita do total controle na etapa de elaboração na aciaria, incluindo rigorosos controles na composição química dos elementos, como carbono, enxofre, manganês, silício, alumínio, titânio e fósforo, além da baixa contaminação por inclusões.

3.3 Qualidade do aço GO

Para a produção dos aços elétricos de grão orientados (GO) é necessário manter baixos níveis dos teores de elementos químicos tais como alumínio, titânio e fósforo, além de atender faixas estreitas de carbono, manganês e enxofre, que conseqüentemente tem grande influência nas propriedades finais do produto.

Para atender as excelentes propriedades magnéticas na direção da laminação, o aço GO necessita de processos tecnológicos complexos, o que requer alto controle durante sua elaboração na aciaria.

Segundo NOLASCO et al. (2000), por tratar-se de um aço especial, os teores de elementos residuais estabelecidos para o GO são restritos, o que exige rigoroso controle das matérias primas utilizadas no seu processo de fabricação. Os principais elementos indesejáveis nos aços elétricos GO são: alumínio, titânio, cobre, cromo, níquel, hidrogênio, nitrogênio, fósforo e oxigênio.

NOLASCO et al. (2000), cita que para garantir baixos teores dos elementos contaminantes como, por exemplo, titânio, alumínio e fósforo, devem-se evitar a passagem da escória do convertedor para a panela para evitar a redução destes óxidos presentes nesta escória, durante o processo de desoxidação do aço com ligas de silício e incorporação destes elementos no banho metálico.

Dentro desta ótica e considerando as informações citadas por MARTINS (2002), a escória torna-se essencial para garantir a qualidade química para o aço GO. Além da forte influência na qualidade do aço, a escória tem importante ação sobre a formação de impurezas no aço, pois as inclusões no aço podem ser endógenas (provenientes das reações de desoxidação) e exógenas (provenientes da escória, pós fluxantes e refratários).

3.4 Escória

A escória de aciaria é um subproduto gerado durante a produção do aço, podendo ser oriunda de diferentes processos, tais como as geradas nos fornos conversores Linz-Donawitz - LD, ou de arco elétrico - FEA MANCIO (2001).

DELLA et al. (2005), comenta que a escória pode ser considerada como um resultado da agregação de diversos elementos cuja presença não é interessante no produto aço, sendo esta escória composta basicamente por SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , MnO , Fe_2O_3 e Cr_2O_3 .

A tabela III.1 apresenta composições típicas de escórias de processos siderúrgicos.

Tabela III.1 – Composições típicas de escória de processos siderúrgicos.(SILVA 1998)

Escória	Composição Química (% peso)					Outros
	SiO ₂	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	
Alto-Forno	30-40	35-45	-	12-18	3-8	MnO
Conversor	10-20	40-50	10-25	-	4-10	MnO, P ₂ O ₅
Forno Elétrico (escória redutora)	15-20	60-65	<1.0	<3.0	5-10	CaF ₂

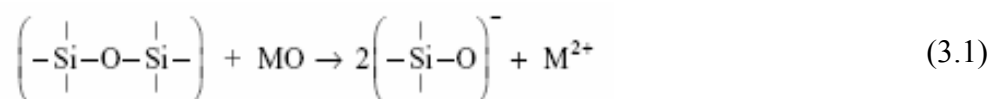
SILVA (1998) comenta que a escória, em um processo metalúrgico não é um subproduto que ocorre de forma pouco controlada. Para garantir a eficiência da remoção das impurezas e a separação dos compostos indesejáveis assim como a própria separação da escória do metal, é necessário que propriedades como viscosidade, densidade e tensão superficial sejam cuidadosamente controladas. Assim, adições de fundentes e formadores de escória são utilizados em, essencialmente, todos os processos metalúrgicos. Além destas funções, as escórias podem servir para proteger o metal de contato com o ambiente e controlar as perdas térmicas do metal.

CAPODILUPO et al. (1990) comentam que o aumento da viscosidade tende a estabilizar a espumação da escória, sendo que a viscosidade é também influenciada pela composição química e temperatura da escória.

3.4.1 Aspectos estruturais da escória

Segundo SILVA (1998) a descrição do comportamento dos diferentes solutos em escórias industriais tem sido um grande desafio, devido ao fato destas escórias raramente serem soluções diluídas, além da sua complexidade estrutural.

De acordo com FRUEHAN (1998) a adição de óxidos metálicos como o CaO, FeO, MgO e outros na escória, provocam a quebra dos anéis de sílica desarranjando as cadeias. A equação 3.1 apresenta a fórmula da reação de quebra das cadeias de sílica de forma generalizada.



A dissolução de óxidos metálicos na sílica líquida é representada de forma esquemática pela figura 3.2.

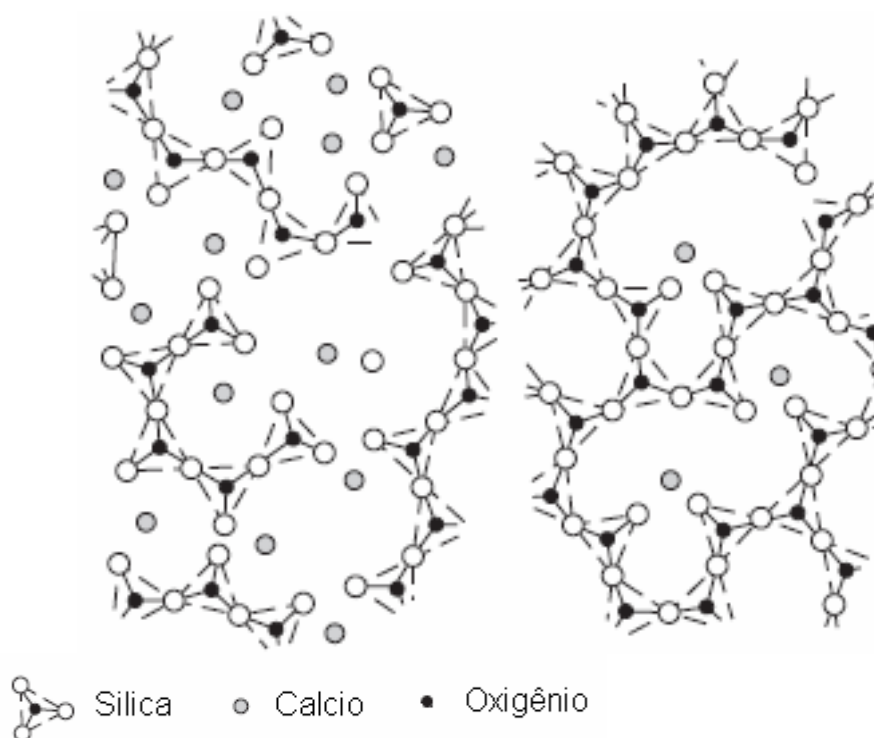


Figura 3.2 - Representação esquemática da dissolução de óxidos metálicos na sílica líquida (SLAG ATLAS, 1981).

De acordo com SILVA (1998) e RIBEIRO (2007) a escória deve ser controlada de forma que as propriedades como a viscosidade, ponto de fusão, densidade, tensão superficial e o grau de oxidação garantam a eficiência da remoção das impurezas, a separação dos compostos indesejáveis, o isolamento do metal com o ambiente, o controle das perdas térmicas e a sua própria separação do metal.

FRUEHAN (1998) classifica os óxidos presentes na escória, dentro do modelo iônico, que distingue doadores e receptores de O^{2-} . Os óxidos doadores são classificados

como básico e os receptores como ácidos. Os óxidos classificados como intermediários podem ser básicos ou ácidos dependendo do grau de atividade de O^{2-} ver figura 3.3.

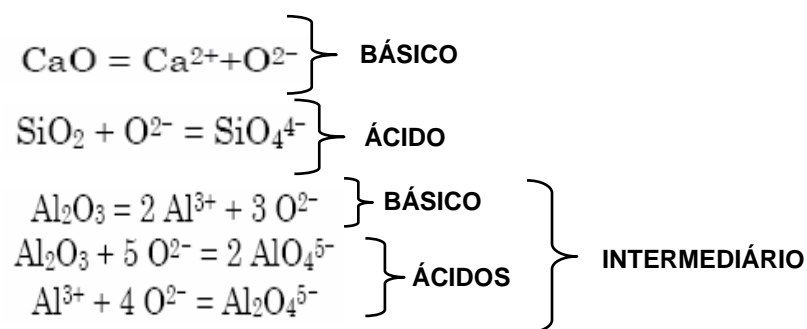


Figura 3.3 - Classificação dos óxidos presentes na escória (FRUEHAN, 1998).

3.4.2 Basicidade da escória

Segundo CUNHA (2006), o conceito de basicidade refere-se à relação entre óxidos básicos e óxidos ácidos. Os primeiros são constituídos de “elementos quebradores de rede” enquanto que os últimos são, em suma, os que formam o retículo das escórias.

A definição de basicidade para SILVA (1998) e RIZZO (2006) é de caráter empírico, devido à dificuldade de medir a atividade de O^{2-} na escória. Assim, vários indicadores indiretos para quantificar a característica da escória quanto à atividade de O^{2-} foram propostos. A tabela III.2, lista os indicadores mais comuns.

Tabela III.2 – Indicadores quantitativos dos valores da basicidade da escória mais comuns (SILVA, 1998)

Basicidade V	$\frac{\%CaO}{\%SiO_2}$	
	$\frac{\%CaO}{(\%SiO_2 + \%Al_2O_3)}$	Alto-Forno (% peso)
	$\frac{\%CaO}{(\%SiO_2 + \%P_2O_5)}$	Aciaria (% peso)
	$\frac{(\%CaO + \%MgO)}{(\%SiO_2 + \%P_2O_5)}$	Aciaria (% peso)
	$\frac{X_{CaO}}{(X_{SiO_2} + 2X_{P_2O_5} + 0,5X_{Al_2O_3} + 0,5X_{Fe_2O_3})}$ *	Fração molar
Excesso de Base	$B = \%CaO - 1,86\%SiO_2 - 1,19\%P_2O_5$ *	% peso
	$B = X_{CaO} - 2X_{SiO_2} - 4X_{P_2O_5} - 2X_{Al_2O_3} - X_{Fe_2O_3}$ *	Fração molar
Basicidade Ótica	$\Lambda = \sum_i \Lambda_i X_i \quad \Lambda_i = \frac{0,74}{(\chi - 0,26)}$	Média ponderada da basicidade ótica de cada óxido, calculada em função da eletronegatividade.

De acordo com RIZZO (2006) a basicidade das escórias utilizadas no refino dos aços é baseada na relação (% em massa) de cal (CaO) por sílica (SiO₂) conhecida pelo nome de basicidade binária, com os valores dessa relação variando entre 1,8 a 3,5.

Segundo FRUEHAN (1998) algumas propriedades físico-química das escórias como sua capacidade de dessulfuração, de desfosforação, de carbonetação e a viscosidade, estão relacionadas diretamente com o valor da basicidade binária.

O SLAG ATLAS (1995) traz várias formas de cálculo da basicidade da escória, que podem ser vistas na tabela III.3.

Tabela III.3 – Exemplos típicos para vários índices usados para expressar basicidade (SLAG ATLAS,1995).

$\frac{\% (\text{CaO})}{\% (\text{SiO}_2)}$
$\frac{x (\text{CaO}) + (\text{MgO})}{x (\text{SiO}_2)}$
$\frac{\% (\text{CaO})}{\% (\text{SiO}_2) + \% (\text{Al}_2\text{O}_3)}$
$\frac{\% (\text{CaO})}{\% (\text{SiO}_2) + \% (\text{P}_2\text{O}_5)}$
$\frac{x (\text{MeO}) - 3x (\text{P}_2\text{O}_5)}{x (\text{SiO}_2)}$
$\frac{\% \text{CaO} + 1.4 \% \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + 0.84 \% \text{P}_2\text{O}_5}$
$\frac{x (\text{MeO})}{x (\text{SiO}_2) + 2x (\text{P}_2\text{O}_5) + \frac{1}{2}x (\text{Al}_2\text{O}_3) + \frac{1}{2}x (\text{Fe}_2\text{O}_3)}$
$\frac{x(\text{CaO}) - 4x (\text{P}_2\text{O}_5)}{x (\text{SiO}_2)}$
$\% (\text{CaO}) - 1.86 \% (\text{SiO}_2) - 1.19 \% (\text{P}_2\text{O}_5)$
$x (\text{MeO}) - 2x (\text{SiO}_2) - 4x (\text{P}_2\text{O}_5) - 2x (\text{Al}_2\text{O}_3) - x (\text{Fe}_2\text{O}_3)$
$x (\text{CaO}) + \frac{2}{3}x (\text{MgO})/x(\text{SiO}_2) + x (\text{Al}_2\text{O}_3)$
$x (\text{CaO}) + \frac{2}{3}x (\text{MgO})/x(\text{SiO}_2) + x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
$x (\text{CaO}) + 0.5x (\text{MgO})/x(\text{SiO}_2) + 0.33x (\text{Al}_2\text{O}_3)$

Entretanto, SILVA (1998) comenta que os casos que ocorre a adição de fluorita na formação da escória, ou quando há presença de óxidos de caráter anfótero, como TiO_2 ou Al_2O_3 , não podem ser avaliados com as relações mostradas na tabela III.3, devido às mesmas envolverem decisões arbitrárias quanto à natureza ácida ou básica de um óxido.

Na tentativa de suprir esta deficiência, surgiu o conceito de basicidade ótica. Neste caso, a basicidade é enfocada em termos de capacidade de doação de elétrons. A

palavra ótica deriva da possibilidade de se medir a basicidade da escória espectroscopicamente.

3.4.2.1 Basicidade ótica

Segundo SILVA (1998), é possível associar a basicidade de um óxido com a medida da atração do seu cátion pelo oxigênio, conforme equação 3.2.

Na tabela III.4, são informados os valores de eletronegatividade e raio iônico para os principais cátions presentes nas escórias, assim como os valores de basicidade ótica calculados pela equação 3.2.

$$I = \frac{2z}{(r + 1,44)^2} \quad (3.2)$$

Onde:

I = Atração íon-oxigênio;

z = Valência do cátion;

r = Raio do cátion (Å);

1,44 = Raio do ânion oxigênio (Å)

Ainda pela tabela III.4, observa-se que os óxidos básicos apresentam menos afinidade pelo oxigênio que os óxidos ácidos. Diante disso, existem conceitos de basicidade com relação aos óxidos que compõem a escória como, por exemplo, definindo-se como básicos aqueles capazes de fornecer O^{2-} e ácidos como os que são capazes de absorver O^{2-} .

A basicidade ótica de um óxido pode ser calculada em função da eletronegatividade de Pauling de um determinado cátion, através da equação 3.3 abaixo.

$$\Lambda = \frac{0,74}{\xi - 0,26} \quad (3.3)$$

Onde:

Λ = Basicidade ótica;

ξ = Eletronegatividade de Pauling.

Tabela III.4 - Parâmetros e resultados sobre alguns óxidos. SILVA (1998)

<i>Caráter do óxido</i>	<i>Óxido</i>	<i>Eletronegatividade do cátion (ξ)</i>	<i>Raio catiônico (Å)</i>	<i>Atração íon-oxigênio (I)</i>	<i>Basicidade ótica (Λ)</i>
B	K ₂ O	0,8	1,33	0,27	1,37
Á	Na ₂ O	0,9	0,95	0,36	1,16
S	Li ₂ O	0,95	0,60	0,50	1,07
I	BaO	0,9	1,35	0,53	1,16
C	SrO	1,0	1,13	0,63	1,00
O	CaO	1,0	0,99	0,70	1,00
A	MnO	1,4	0,80	0,83	0,65
N	FeO	1,7	0,75	0,87	0,51
F	ZnO	1,5	0,74	0,87	0,60
Ó	MgO	1,2	0,65	0,95	0,79
T	BeO	1,5	0,31	1,37	0,60
E	Cr ₂ O ₃	1,6	0,64	1,44	0,55
R	Fe ₂ O ₃	1,8	0,60	1,50	0,48
O	Al ₂ O ₃	1,5	0,50	1,66	0,60
Á	TiO ₂	1,6	0,68	1,85	0,55
C	GeO ₂	1,8	0,53	2,14	0,48
I	B ₂ O ₃	2,0	0,20	2,34	0,43
D	SiO ₂	1,8	0,41	2,44	0,48
O	P ₂ O ₅	2,1	0,34	3,31	0,40

A figura 3.4, mostra a evolução da basicidade ótica para os óxidos dados pela tabela III.4. Pode-se observar através desse gráfico que os óxidos ácidos possuem maior atração pelo oxigênio.

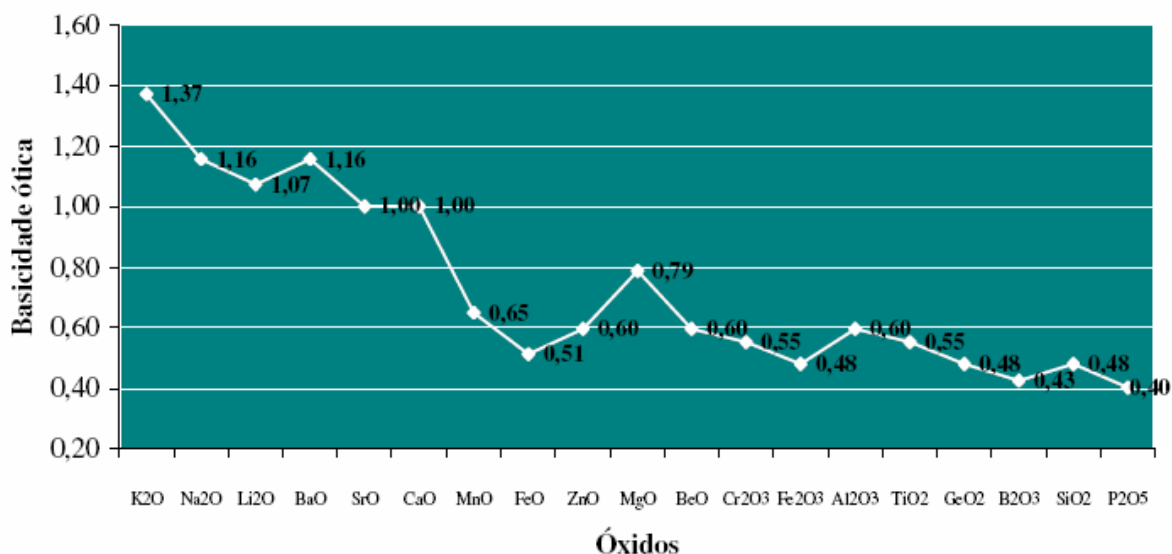


Figura 3.4 – Evolução da basicidade ótica para os óxidos da tabela III.4 (SILVA, 1998).

3.4.3 Capacidade de dessulfuração da escória

Como o aço GO possui faixa de enxofre na composição química final, durante o processo de fabricação deste aço na aciaria são normais as frequentes intervenções para correção do teor de enxofre no forno panela.

Para garantir uma maior estabilidade do processo deve-se ter uma escória com a capacidade de dessulfuração controlada. Assim a escória sintética misturada fisicamente é saturada em enxofre (aproximadamente 1%), além do controle da basicidade binária (CaO/SiO₂) em torno de 0,8.

Segundo RIBEIRO (2007) para entender a dessulfuração do aço líquido, devemos primeiro definir a capacidade de uma escória absorver enxofre, ou seja, capacidade de sulfeto (C_S). A equação 3.4, conforme TURKDOGAN (1996), apresenta a expressão para o cálculo de C_S . Onde (%S) é o percentual de enxofre da escória, o (P_{O_2}) é a pressão parcial de oxigênio e (P_{S_2}) é a pressão parcial de enxofre.

$$C_S = (\%S) \left(\frac{P_{O_2}}{P_{S_2}} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

RIBEIRO (2007) e TURKDOGAN (1996) concordam que quanto maior for C_S maior a capacidade de incorporar enxofre por determinada escória. O diagrama ternário da figura 3.5 mostra que as escórias de aluminatos de cálcio são muito superiores para dessulfurar aços acalmados, quando comparadas com as escórias de silicatos.

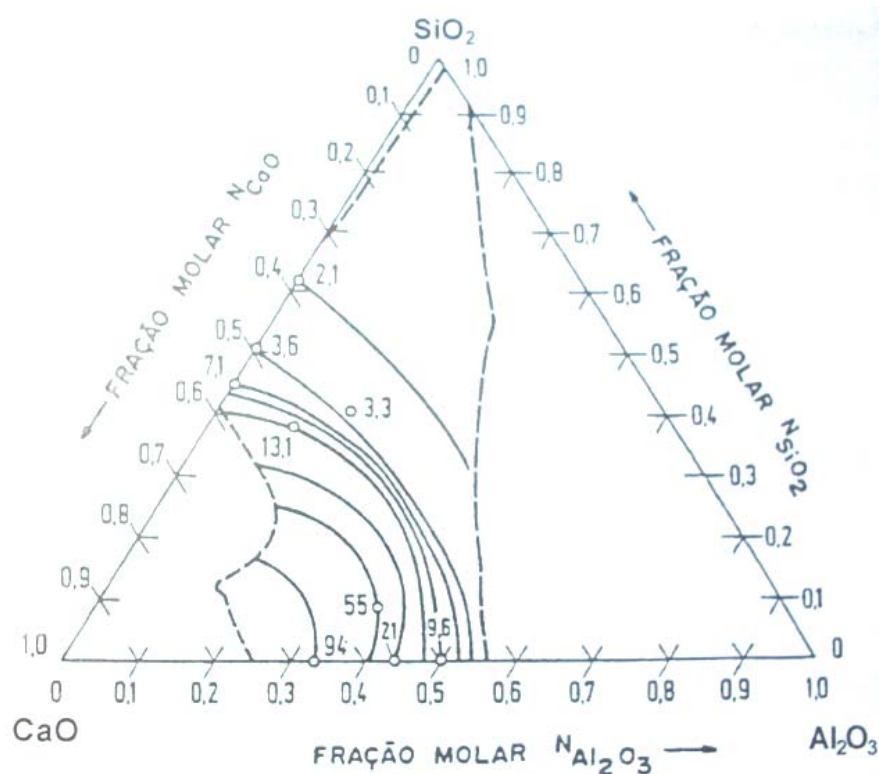


Figura 3.5 - Diagrama ternário Al_2O_3 - CaO - SiO_2 , 1650°C, mostrando $C_S \times 10^4$ (SLAG ATLAS,1981)

TURKDOGAN (1996) e FRUEHAN (1998) mostraram outros tipos de escórias e suas respectivas C_S , na figura 3.6. Vê-se que escórias à base de fluorita também podem ser bons agentes dessulfurantes, além daquelas de aluminatos de cálcio. Escórias de silicatos de cálcio não são indicadas para dessulfuração.

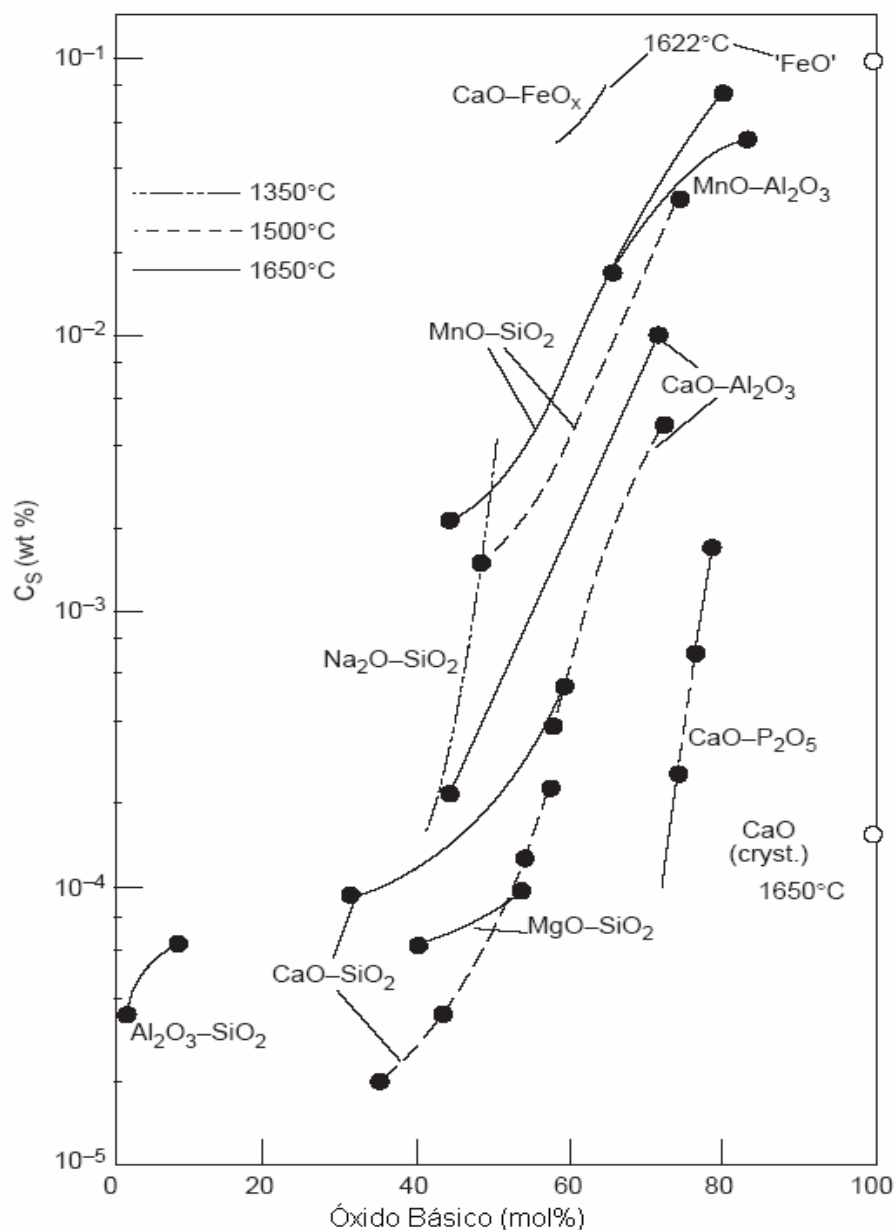


Figura 3.6 - Capacidade de sulfeto de varias escórias dos sistemas binários (TURKDOGAN, 1983 apud FRUEHAN,1998).

Para calcular o valor de C_S utilizando a expressão da equação 3.5, a dificuldade é evidente, por envolver valores de pressões parciais de oxigênio e enxofre. De acordo com RIBEIRO (2007) utilizar o valor da distribuição ou partição de enxofre entre escória e metal, é uma forma mais simples de verificar a capacidade dessulfurante de uma determinada escória. A equação 3.5 apresenta o calculo para o valor de partição de enxofre entre a escória e o aço.

$$\frac{(\%S)}{\%S} = C'_s \frac{f_s}{h_o} \quad (3.5)$$

Onde:

C'_s = Capacidade de uma escória absorver o enxofre no equilíbrio escória/aço;

f_s = Coeficiente de atividade do enxofre;

h_o = Atividade henriana do oxigênio dissolvido no aço

$\%S$ = percentual de enxofre dissolvido no aço.

A simples verificação da equação 3.5 indica que a partição do enxofre escória/metal aumenta com o aumento de C'_s e f_s , e com a diminuição de h_o . RIBEIRO (2007), comenta que devido a estes fatores é mais fácil dessulfurar aços de alto teor de carbono, sendo que a desoxidação deve ser feita antes da dessulfuração. A figura 3.7 representa esquematicamente a mudança na distribuição de enxofre em equilíbrio, com a elevação de a_{CaO} (atividade raoultiana) e redução de h_o .

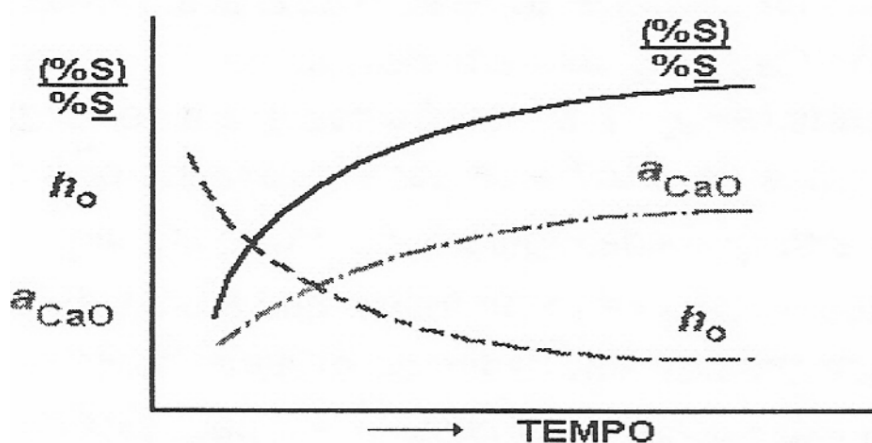


Figura 3.7 - Representação esquemática do efeito da formação da escória e desoxidação sobre a distribuição do enxofre (HOLAPPA,1980).

3.4.3.1 Influência da oxidação da escória

De acordo com TURKDOGAN (1996) um fator que pode controlar a transferência de enxofre para escória é o poder oxidante desta, determinado pelos teores de óxidos de

ferro (FeO) e óxidos de manganês (MnO). Quanto maior forem estes teores, maior será h_o no aço.

RIBEIRO (2007), comenta que valores altos de FeO e MnO podem ser justificados pela passagem de escória do forno primário para panela e pelo excesso de oxigênio dissolvido na escória e no aço em função do sopro de oxigênio no convertedor. A relação existente entre Fe_T (ferro total da escória) + MnO com a taxa de dessulfuração é mostrada na figura 3.8.

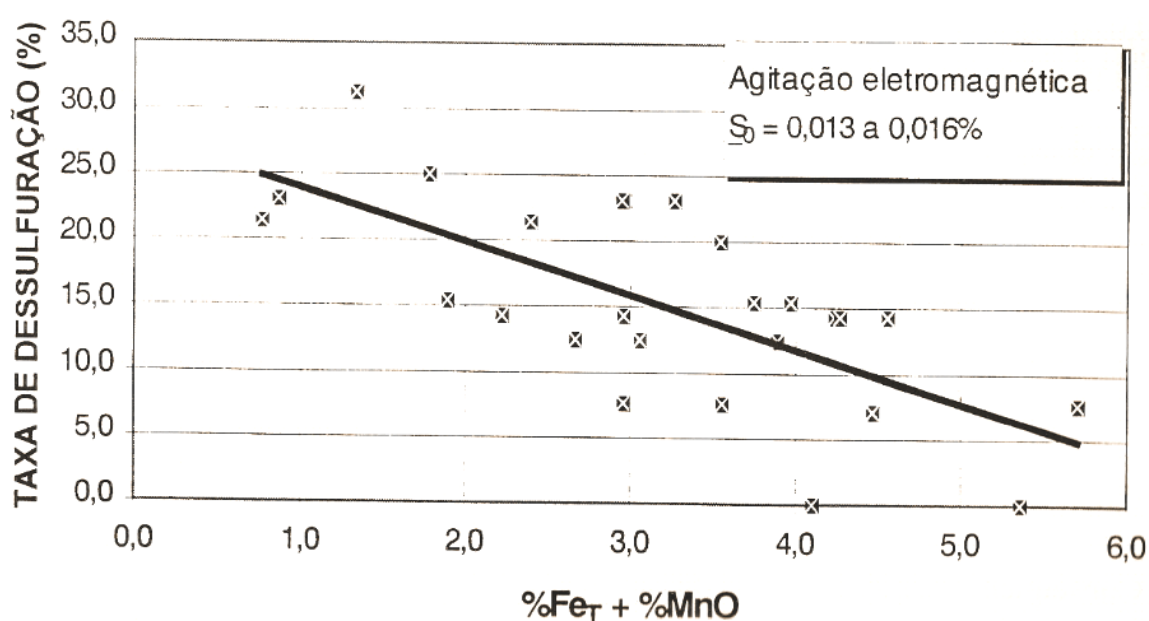
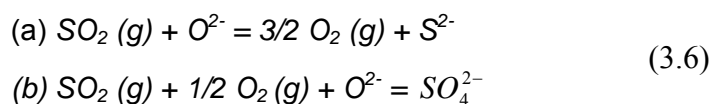


Figura 3.8 - Taxa de dessulfuração e função do $Fe_T + MnO$ (RIBEIRO, 2007).

3.4.3.2 Dessulfuração sob vácuo - aspectos cinéticos e termodinâmicos

SILVA (1998) e RIBEIRO (2007) concordam que varias são as espécies que podem conter o enxofre nas escórias de fabricação do ferro e do aço. A equação 3.6 apresenta as reações de dissociação do enxofre predominantes para baixas e altas pressões de oxigênio.



Nos processos de dessulfuração do aço sob vácuo as pressões de oxigênio encontradas são usualmente menores que 10^{-4} atm, permitindo supor que a espécie dominante de enxofre seja o ânion S^{2-} . A figura 3.9 mostra de forma esquemática o mecanismo de transferência de massa de enxofre desde o metal até o gás via escória. O enxofre removido permanece na escória RIBEIRO (2007).

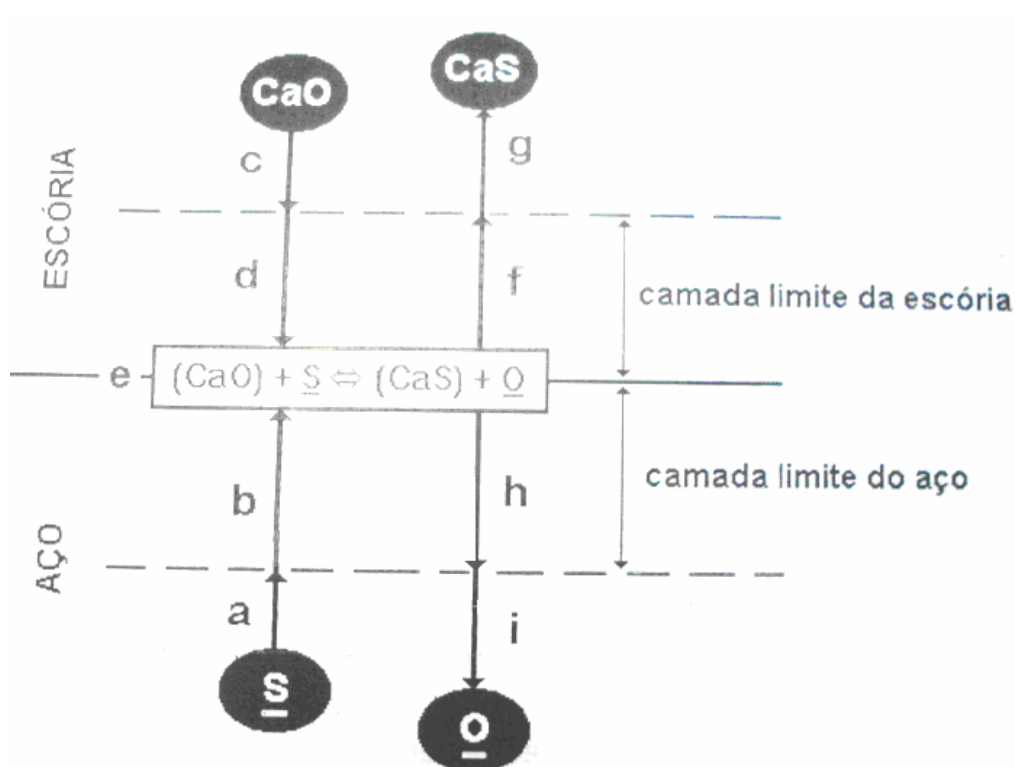


Figura 3.9 - Mecanismo de transferência de enxofre desde o metal até o gás, via escória (RIBEIRO, 2007).

As letras representam:

- a – difusão do enxofre através do aço;
- b – difusão do enxofre através da camada limite do aço;
- c – difusão do CaO através da escória;
- d – difusão do CaO através da camada limite da escória;
- e – reação química na interface;
- f – difusão do CaS através da camada limite da escória;
- g – difusão do CaS através da escória;
- h – difusão do oxigênio através da camada limite do aço;
- i – difusão do oxigênio através do aço.

Segundo FRUEHAN (1998), a dessulfuração sob vácuo é favorecida pela sinergia entre aplicação de vácuo e a insuflação de gases inertes. O efeito é de origem cinética e esta relacionada ao grau de agitação do banho metálico.

A figura 3.10 apresenta a influência do vácuo sobre a dessulfuração do aço a uma vazão de gás inerte constante (0,012 Nm³/s).

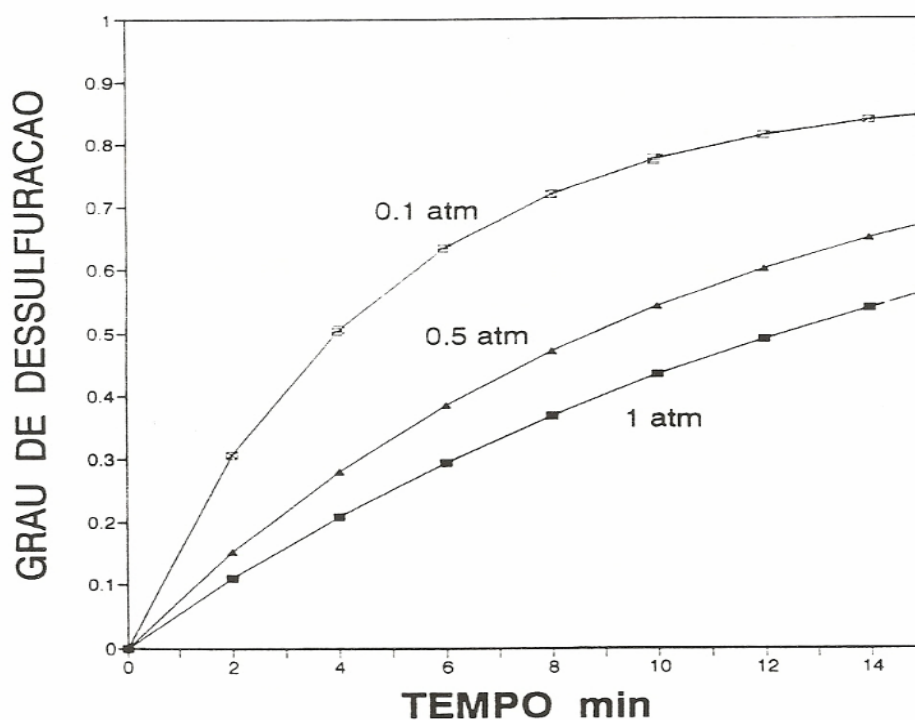


Figura 3.10 - Grau de dessulfuração em função do tempo de exposição ao vácuo (RIBEIRO, 2007).

Para FRUEHAN (1998) a área de interface metal/escória influencia diretamente na taxa de dessulfuração (K_S) do aço. O valor K_S depende da dissipação de energia por unidade de área na interface, das propriedades da escória (como a viscosidade) e do volume de escória. A expressão para o cálculo de K_S esta representada na equação 3.7, onde (m_s) é o coeficiente de transferência de massa, (A) é a área da interface e (V) é o volume de aço e escória.

$$k_s = m_s \left(\frac{A}{V} \right) \quad 3.7$$

A figura 3.11 mostra o efeito da taxa de vazão gás no valor de K_S .

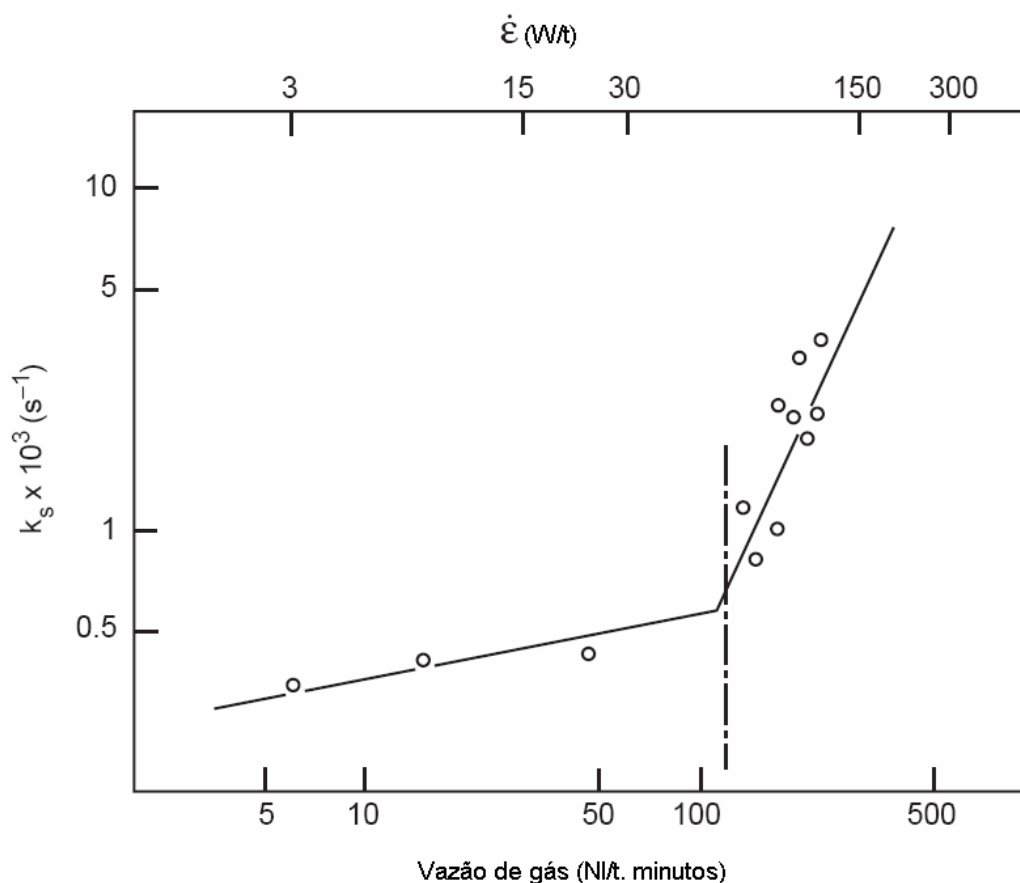


Figura 3.11 - Efeito da vazão de gás no valor de K_S (ASAI, KAWACHI e MUCHI, 1983 apud FRUEHAN, 1998).

De acordo com Ribeiro (2007) as condições termodinâmicas mais favoráveis para a dessulfuração seriam:

- Grande quantidade de escória, capaz de diluir o enxofre removido do aço e impedir que a atividade do S^{2-} cresça;
- Escória básica, possibilitando altos valores do ânion O^{2-} ;
- Baixos potenciais de oxigênio no metal;
- Temperaturas altas, uma vez que as reações são endotérmicas.

3.4.4 Escória do convertedor

Segundo ATHAYDE (2005), no convertedor com sopro de oxigênio pelo topo, a transferência de oxigênio pela escória é essencial, pois não somente uma grande parte da descarburização, mas também grande parte da oxidação de elementos como o manganês e fósforo ocorrem na interface entre metal e escória em emulsão.

ATHAYDE (2005) comenta que o alto teor de ferro contido na escória do convertedor com sopro de oxigênio pelo topo favorece a dissolução da cal formando uma escória mais fluida com maior emulsão, facilitando a desfosforação em corridas nas quais aços com altos teores de carbono são objetivados no vazamento.

No final do sopro, quando as escórias de sopro pelo fundo tornam-se líquidas e reativas, a agitação do sopro pelo fundo favorece a transferência de massa entre metal e escória; as reações entre oxigênio, fósforo e manganês aproximam-se mais do equilíbrio em relação ao sopro pelo topo, onde o desequilíbrio, que é criado durante o sopro, não pode ser eliminado devido à fraca agitação do banho. As figuras 3.12 e 3.13 mostram estas relações, quando comparado os convertedores do tipo Q-BOP (Quick Basic Oxygen Process) e LD (Linz e Donawitz).

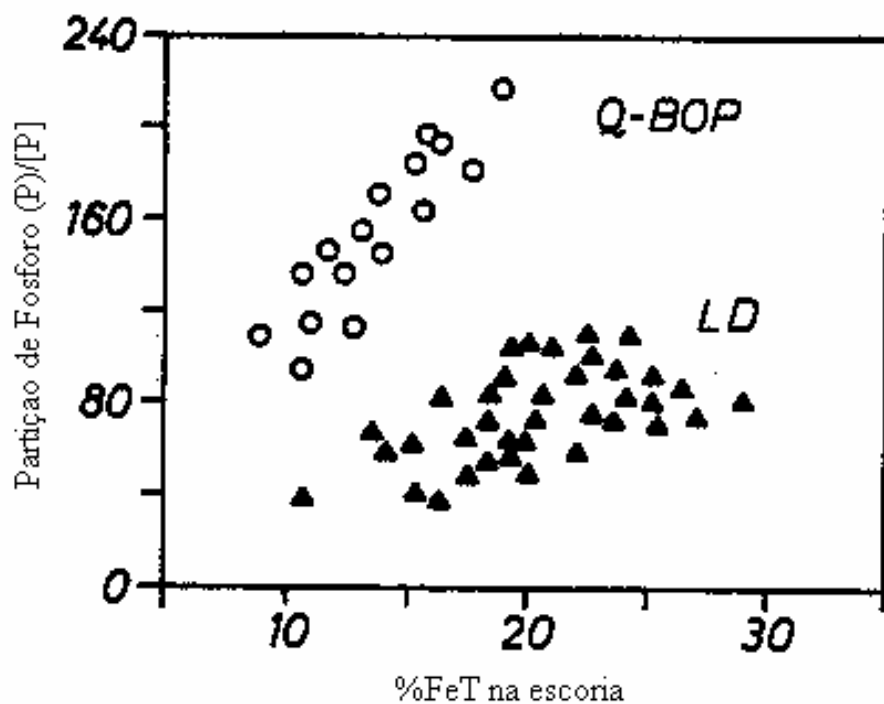


Figura 3.12 - Relação entre a partição de fósforo e Fe total na escória (NILLES,1982 Apud ATHAYDE,2005).

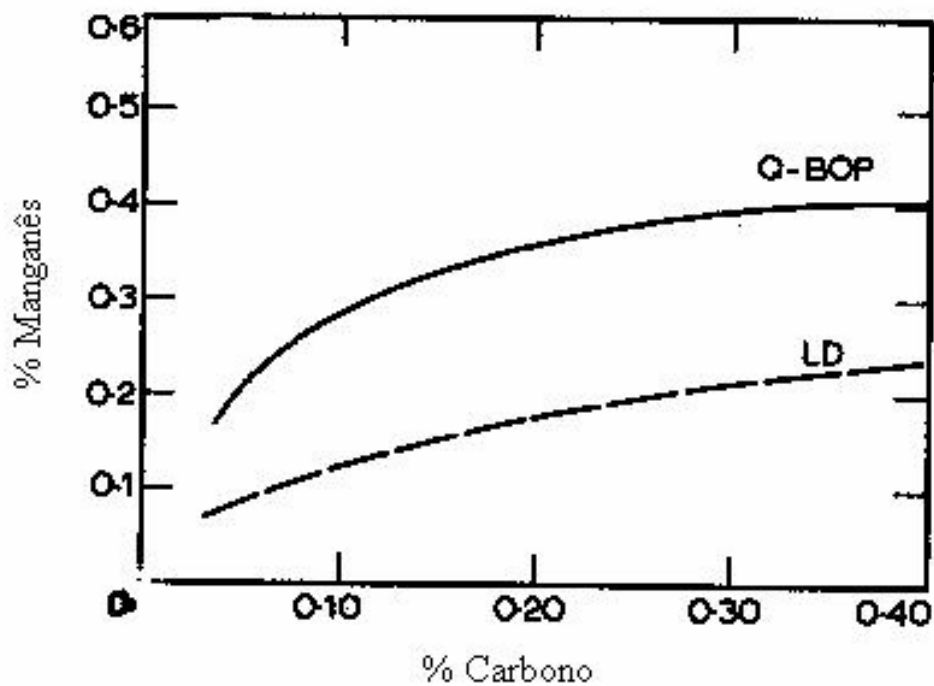


Figura 3.13 - Relação entre %Mn de vazamento e %C para os processos Q-BOP e LD (NILLES,1982 Apud ATHAYDE,2005).

Como os aços GO possuem fortes restrições aos teores de fósforo, a etapa de elaboração do aço no convertedor torna-se essencial, pois nesta etapa ocorre a redução do teor de fósforo oriundo do gusa ou das matérias-primas adicionadas.

Como a escória do convertedor é muito rica em óxido de fósforo, manganês, alumínio e titânio, deve-se minimizar a passagem de escória do convertedor para a panela, para evitar que durante o processo de desoxidação do aço na panela, estes elementos sejam também reduzidos da escória para o aço.

Existem vários tipos de dispositivos empregados para impedir a passagem excessiva de escória do convertedor para panela após o vazamento do aço. No caso do convertedor MRP-L da ArcelorMittal Inox Brasil, o final do vazamento do aço é identificado visualmente pelo forneiro mestre, embora varias empresas utilizam de técnicas automáticas para corte de escória do convertedor para a panela, como AMEPA, BOLA e DADOS.

No caso da ArcelorMittal Inox Brasil, passa-se no máximo 4cm de escória do convertedor para a panela, quando este valor é superado deve-se levar a panela para o raspador de escória antes da adição das ligas na panela.

Como a escória é essencial para produção do aço GO, após o vazamento do aço do convertedor para a panela adiciona-se escória sintética.

3.4.5 Escória sintética

A escória sintética é um material inorgânico, não-metálico, vítreo e polifásico que pode ser gerado ou incorporado aos processos metalúrgicos.

Dentre as principais funções de uma escória sintética estão: a proteção do revestimento da panela, refino do aço, captação de inclusões e melhoria da limpidez do aço.

A escória sintética pode ser fabricada através de processos como a fusão, pelletização, sinterização, briquetagem ou simplesmente utilizando-se uma mistura de matérias-primas.

Segundo BARRIOS et al. (1994), a utilização de escória sintética permite aumentar a qualidade intrínseca do produto final, além de permitir ganhos de produtividade.

Dentre os objetivos da utilização de escória sintética, BARRIOS et al. (1994) citam a condutividade elétrica desta escória para facilitar o tratamento do aço em forno panela, que é atendido pela adição suplementar de uma cobertura isolante térmica, que pode ser básica (MgO) quando se tratar de revestimento refratário básico na linha de escória.

Segundo BARRIOS et al. (1994), o sistema mais utilizado de escoria sintética são misturas de cal virgem e fluorita adicionadas na superfície do aço a partir de silos ou sacarias. Neste procedimento, geralmente ocorre uma heterogeneidade química ao longo da camada de escória em função da não homogeneização da escória, levando a uma dificuldade de completa fusão do material, além de facilitar a concentração do fundente em regiões próximas ao refratário da linha de escória, favorecendo o seu desgaste de forma acentuada.

NOLASCO et al. (2000) afirmam que durante o tratamento de um aço com escória sintética vários objetivos podem ser atendidos, como:

- Proteção do aço líquido, evitando o seu contato com a atmosfera, absorvendo os gases H_2 , N_2 e O_2 .
- Minimização das perdas térmicas, proporcionando um melhor controle da temperatura do aço.
- Absorção e incorporação de impurezas que podem prejudicar a qualidade do produto, tais como, enxofre, fósforo, hidrogênio.
- Impedimento da exposição do arco elétrico durante o aquecimento do aço no forno panela, diminuindo o desgaste do refratário da panela e da abóbada.

KRÜGER et al. (2000) comentam que é muito importante a definição do momento de adição da escória sintética na panela, além do acompanhamento da escória resultante da mistura entre a escória sintética adicionada na panela mais a escória oriunda do convertedor.

KRÜGER et al. (2000) comentam também que antes da capacidade de dessulfuração da escória a mesma deve apresentar excelente capacidade de limpeza das inclusões do aço.

NOLASCO et al. (2000) mostram que a escória sintética pode ser preparada das seguintes formas:

- Mistura: possui um custo menor, mas possui o inconveniente de ser mais susceptível à hidratação e variação no desempenho.
- Sinterizada: é um produto obtido pelo aquecimento abaixo do ponto de fusão completo dos componentes da escória. O produto obtido é poroso e pode se hidratar.
- Pré-fundida: obtida pela fusão dos componentes. Caracteriza-se pela consistência da composição e hidratação quase nula devido à baixa porosidade.

É importante estabelecer a quantidade e o tipo de escória a ser utilizada no tratamento do aço, segundo NOLASCO et al. (2000), o cálculo da massa da escória pode ser dado pela expressão 3.8:

$$m_E = \pi/4 \times D_p^2 \times E \times \rho \quad (3.8)$$

Onde:

m_E é a massa de escória (g);

D_p é o diâmetro da panela (cm);

E é a espessura da escória (cm);

ρ é a massa específica da escória (g/cm^3).

NOLASCO et al. (2000) ressaltam que a escolha do tipo de escória pode ser feita através da utilização de diagrama de fases para obter valores para algumas propriedades da escória, bem próximo dos valores reais e observar se a escória

formada possui as características mínimas necessárias para o processo de refino do aço, sendo importante observar:

- o tipo de aço, e o grau de desoxidação;
- o tipo de revestimento refratário da panela.(inclui o ponto final);
- as características da escória como temperatura liquidus e viscosidade.

3.4.6 Sinterização de minério de ferro

Como não encontramos artigos descrevendo o processo de sinterização de escória sintética e para entendermos o processo de sinterização trataremos a seguir a sinterização de minério de ferro.

Segundo SANBONGI (1966), Praticamente todos os estudos neste campo são unânimes em afirmar que a microestrutura tem forte impacto sobre o comportamento de degradação do sinter durante a redução. Portanto, é de grande importância conhecer quais são e como se formam as fases constituintes de um sinter específico. A estrutura do sinter também é formada por hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), ferrito de cálcio ($m\text{CaO}-n\text{Fe}_2\text{O}_3$), silicato de cálcio ($m\text{CaO}-n\text{SiO}_2$), onde m e n são números inteiros pequenos, além da porosidade, de grande importância para a constituição física e para as propriedades metalúrgicas dos aglomerados. Comenta o autor que estas fases se apresentam nas mais diversas formas e tamanhos, resultantes de condições particulares da composição da mistura original e dos parâmetros de processo envolvidos.

HSIEH & WHITEMAN (1989) propuseram modelos generalizados dos mecanismos da formação microestrutural de sinter de minério de ferro. Segundo estes autores, inicialmente os óxidos de ferro reagem com o CaO durante o aquecimento, formando os ferritos de cálcio $\text{CaO}-2\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou $2\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$, dependendo do potencial de oxigênio local. Estes ferritos de cálcio apresentam a forma acicular fina, sendo que com o decorrer do aquecimento, eles podem crescer segundo direções preferenciais, passando para a forma acicular comprida. Importante salientar que, de acordo com os autores, até este ponto não houve a formação de fase líquida.

Segundo VIEIRA et al. (2003), no processo de sinterização, após misturar e homogeneizar um conjunto de matérias-primas com um determinado teor de combustível sólido e submeter esta mistura a uma semi-fusão em atmosfera ora redutora, ora oxidante, a temperaturas da ordem de 1200 a 1400°C. O produto resultante é denominado sínter. O sínter apresenta uma grande heterogeneidade química e microestrutural resultado da fusão total, parcial ou incompleta de alguns constituintes minerais da carga. A Figura 3.14 mostra um exemplo de uma microestrutura, considerada ideal de sínter heterogêneo constituído por uma parte fundida (devido à fusão das partículas aderentes da mistura a sinterizar) e por uma parte não fundida (partículas do minério residual, isto é, das partículas nucleantes). Uma microestrutura ideal assim é capaz de garantir um excelente comportamento no interior do alto-forno, devido às suas excepcionais propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas.

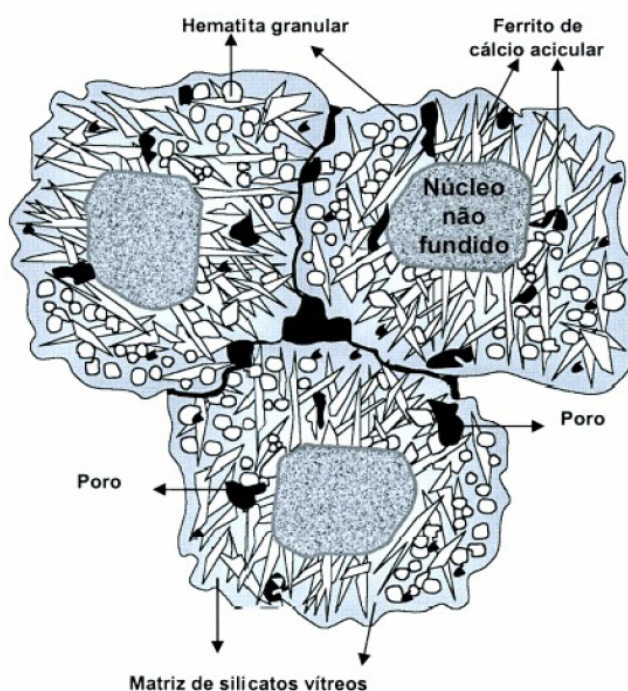


Figura 3.14 - representação microestrutural ideal de um sínter de minério de ferro (VIEIRA, et al., 2003).

Segundo BOUCRAT (1968, apud TAKANO, 1970), pode-se distinguir, na seção vertical de uma carga em processamento de sinterização, num determinado instante, quatro zonas principais, nos fornos usuais de sinterização:

- 1 – Zona fria e úmida constituída da mistura inicial, e eventualmente, de matérias voláteis condensados;
- 2 – Zona de rápido aquecimento (da carga), onde se dá a secagem, a desidratação e início da calcinação;
- 3 – Zona de alta temperatura em que se efetua a combustão do carbono, a redução parcial do óxidos e a fusão parcial da carga, com formação de novas estruturas.
- 4 – Zona de resfriamento com reoxidação e recristalização do minério no aglomerado.

Os aspectos fundamentais da sinterização compreendem assim:

percolação gasosa através das camadas sólidas, transferência de calor gás-sólido, queima do combustível, reações químicas (Inclusive as de redução e reoxidação), fusão e solidificação.

Segundo TAKANO (1970) a sinterização inicia-se com a ignição da parte superior da carga e prossegue com a queima do combustível, com excesso de ar expirado, propagando-se para as camadas inferiores subseqüentes até atingir a camada suporte.

WSCIEKLICA (1962) e BOUCRAT (1968), julgam importantes o fenômeno de transferência de calor desde o nível superior ate o nível inferior da carga, e para uma boa performance destas ondas térmicas é importante controlar as variáveis de processo, como reatividade, teor de combustível da carga e permeabilidade da carga.

Para uma boa permeabilidade ASTIER (1965) julga preferivelmente que o teor de fração da mistura menor que 0,3mm seja da ordem de 10%.

Outro fator importante na sinterização é a características dos combustíveis, VOICE (1953), afirma que o tamanho das partículas dos combustíveis não afeta muita a permeabilidade, desde que se controle a umidade.

WENDERBORN (1953), cita que o tamanho do combustível deve ser menor que 3mm, pois, utilizando frações menores que 3mm, além de diminuir o tempo de sinterização, há uma considerável economia do mesmo.

BOUCRAT (1968) chegou à conclusão de que a granulométrica ótima que o carvão deve possuir é de 0,5 a 3,0mm.

Outro fator importante no processo de sinterização segundo VOICE (1953) é o teor de umidade da mistura, pois a água interfere na permeabilidade, permitindo adesão das partículas finas sobre as maiores e também micropelotizando os finos. Esta linha de raciocínio concorda com MENEZES et al. (2006).

A umidade é importante para controlar a permeabilidade da camada, proporcionar à mistura uma dada resistência mecânica e facilitar a micropelotização. Isto implica dizer que uma mistura com teor de umidade inadequado acarreta queda na qualidade do produto final, o sinter. Pois a adição excessiva de água faz com que a parte viscosa, constituída de finos úmidos, torne-se mais fluida, perdendo assim, as propriedades ligantes e empastando a mistura.

Outro fator importante num processo de sinterização segundo GRICE e DAVIES (1972) é o modo de preparar a mistura a ser sinterizada, pois misturas feitas em tambores rotativos são mais recomendadas, sendo que sua utilização permite obter finos relativamente aderentes às partículas maiores e com leve grau de pelotização. Neste caso não se verifica um adensamento da carga no início da sinterização.

BROUCAUT (1968) comenta que num processo de sinterização deve-se também levar em condições a altura da carga da camada a sinterizar. Ele comenta que menor altura da camada a sinterizar melhora a permeabilidade, porém diminuí a velocidade de propagação da onda térmica e maior é a perda térmica. Alturas maiores permitem melhor aproveitamento térmico, porém com menor produtividade.

3.5 Diagramas de fases

O uso de diagramas de fases para determinar a composição química da escória é fundamental, pois ele permite correlacionar os principais óxidos presentes nas escórias e fornece informações como: atividade dos óxidos, temperaturas de líquidos dos constituintes e tipos de constituintes presentes na escória. CASTRO (1985).

Segundo Castro (1985) os diagramas de isoatividades são traçados para uma determinada temperatura. Alguns diagramas podem conter em seus vértices mais de

um composto e ser traçados para concentração fixa de um determinado composto. São expressos nas unidades de concentração como: fração molar ou porcentagem em peso.

A figura 3.15 mostra um exemplo de diagrama de fase onde são apresentado os constituintes que podem ser formados na escória e as respectivas temperaturas de líquidos.

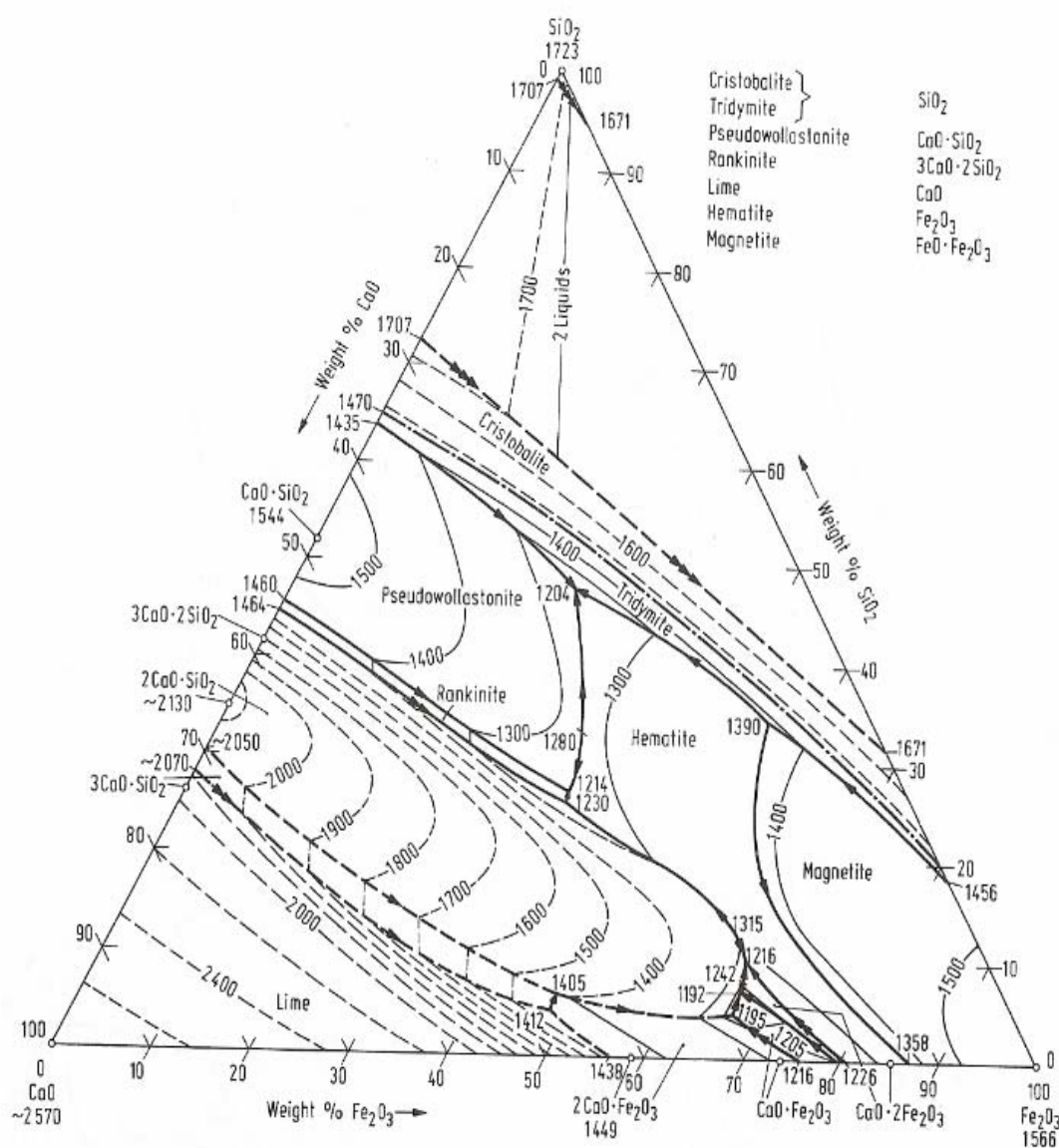


Figura 3.15 – Superfície de equilíbrio entre líquidos e sólidos no diagrama ternário do sistema CaO-SiO₂-FeO. (SLAG ATLAS,1995)

Segundo CASTRO et al. (1985), a determinação da atividade de óxidos em escórias é normalmente feita através do uso de diagramas ternários. Estes diagramas podem ser encontrados em atlas de escórias ou em referências de dados termodinâmicos, onde é determinada a atividade de diversos óxidos. Neste diagramas são especificados, os sistemas (compostos envolvidos), a temperatura para a qual o diagrama foi construído, a unidade de concentração adotada e o estado padrão para avaliação de atividade.

Nesses diagramas são traçadas linhas de isoatividade, ou seja, ao longo dessas linhas a atividade do composto é constante e igual ao valor indicado. Como as composições de escórias de importância na siderurgia variam muito, bem como as temperaturas nas quais escórias se encontram, nem sempre vai se encontrar um diagrama que se adapte perfeitamente à situação. Nesse caso, deve-se usar bom senso e procurar o diagrama disponível que mais se aproxime das necessidades.

A figura 3.16, mostra um exemplo do diagrama de iso-coeficiente de atividade da sílica, no sistema CaO-SiO₂-FeO-MgO a 1600 °C.

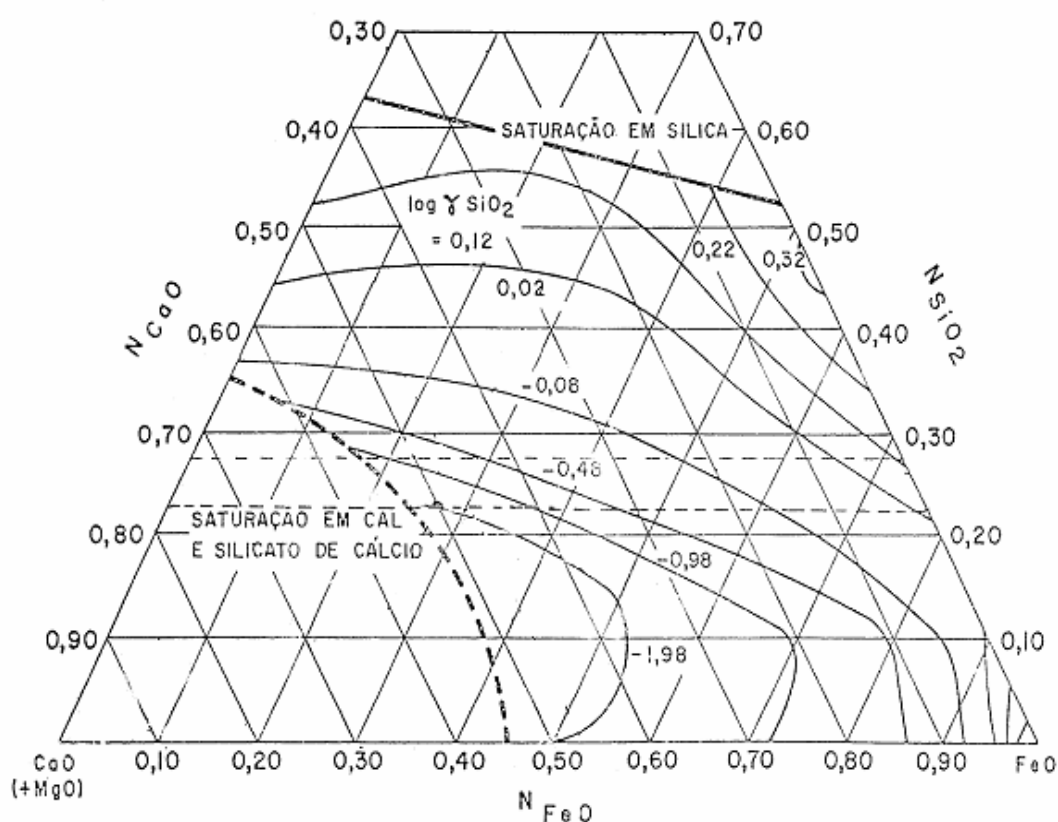


Figura 3.16 - Diagrama de iso-coeficiente de atividade da sílica, no sistema CaO-SiO₂-FeO-MgO a 1600 °C. Fonte: (ELLIOT 1963, apud CARVALHO et al.1977).

3.6 Desgaste do refratário da linha da escória

Segundo BARRIOS et al. (1994), panelas com linhas de escória básica, um bom indicativo do desgaste é a variação do teor de MgO na escória, pois a utilização de escórias contendo MgO na sua composição inicial, tendem a proteger melhor o refratário.

A tabela III.5, mostrada por BARRIOS et al. (1994), demonstra o menor consumo de MgO do revestimento refratário quando se utiliza MgO na composição da escória inicial.

Tabela III.5 – Variação do teor final de MgO em escórias do Forno Panela (Barrios 1994).

Escórias	N° de corridas	MgO inicial (%)	MgO final (%)		
			Médio	Max	Min
Cal + Fluorita	73	0	12,3	25,4	5,1
Escória Sintética	7	11,7	13,1	13,3	12,9

NOLASCO et al. (2000) ressaltam também que para produção de aços em panelas com tijolos refratários básicos, deve-se adicionar certa quantidade de MgO, geralmente de 10 a 12% da massa total de escória, pois como na produção do aço GO objetiva-se trabalhar com uma basicidade binária baixa na escória, para evitar o efeito dessulfurante da escória, ocorre então um aumento da capacidade de absorção de MgO pela escória.

4 MATERIAIS E METODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, a metodologia dos experimentos e ensaios que foram utilizados bem como as técnicas de caracterização necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

4.1 Equipamentos utilizados

Neste projeto foram utilizados os seguintes equipamentos:

4.1.1 Painela de aço

Painela de aço revestida com tijolos refratários dolomíticos, com capacidade de 90t (ver figura 4.1), para receber o metal vazado do convertedor MRPL e realização da metalurgia secundária para lingotamento.



Figura 4.1 - Painela de aço com revestimento dolomítico.

4.1.2 VOD (vacuum oxygen decarburization)

O equipamento VOD na produção do aço GO tem a função de promover a redução no teor de hidrogênio, através da aplicação de um vácuo menor que 10mbar, por no mínimo 5 minutos.

O equipamento VOD é composto por:

- carro tampa (sustenta a abóbada, lança de oxigênio, sistema de amostragem, silo de adição a vácuo, câmera de monitoramento);
- unidade de vácuo;
- sistema de adições de ligas e fundentes;
- vaso;
- sistema de injeção de gás.

A figura 4.2 mostra de forma esquemática o equipamento VOD.

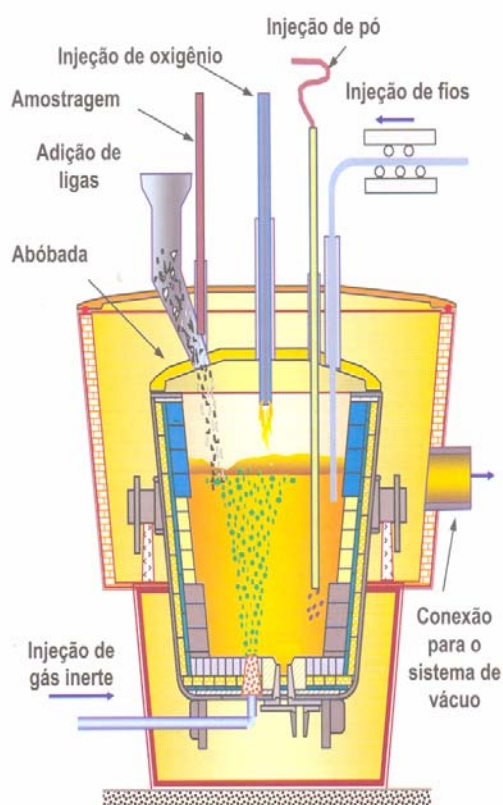


Figura 4.2 - Representação esquemática do VOD (RIZZO, 2006)

4.1.3 Forno panela

Equipamento composto de três eletrodos de grafite, para aquecimento do aço (ver figura 4.3). Para a produção do aço GO o Forno Panela, além de promover o aquecimento do aço para a temperatura especificada no lingotamento contínuo, permite também o ajuste da composição química final do aço GO, como acerto do enxofre, carbono e manganês.

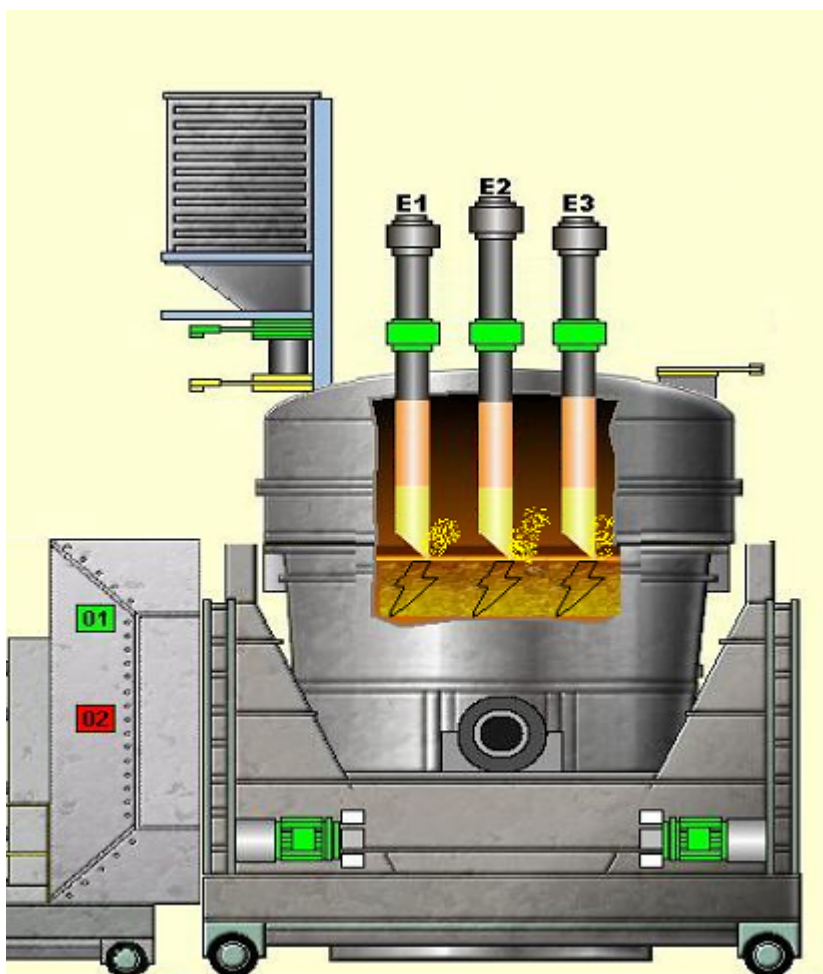


Figura 4.3 – Esquema do Forno Panela da ArcelorMittal Inox Brasil.

4.2 Materiais utilizados

Abaixo serão descritos os materiais utilizados para desenvolvimento do projeto.

4.2.1 Escória sintética sinterizada

Foi desenvolvida em parceria com a empresa Vamtec S.A. e denominada VAMFLUX RGO-SI.

A tabela IV.1, apresenta a propriedade química dos quatro tipos de experimentos desenvolvidos.

Tabela IV.1 - Composição química das escórias sintéticas sinterizadas desenvolvidas e testadas.

Experimento	Especificação (%) em massa								
	Faixa	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	S	C _(fixo)
A	Mínimo	20	20	0	0		0	0	0
	Máximo	50	50	10	5		10	1	2
B	Mínimo	30	20	10	0	0	0	0	0
	Máximo	50	50	20	3,5	5	10	1	1
C	Mínimo	30	20	0	0	0	0	0	0
	Máximo	65	40	15	2,5	8	12	0,5	1
D	Mínimo	25	10	0	0	0	0	0	0
	Máximo	65	35	25	1,8	10	15	0,2	1

Para o desenvolvimento dos experimentos citados na tabela IV.1, as matérias-primas foram inicialmente misturadas durante 2 minutos em uma betoneira. Posteriormente, a mistura recebeu água para ajuste da umidade para 2% e então, prosseguiu-se com a homogeneização da mistura por mais 3 minutos (ver figura 4.4).



Figura 4.4 – Mistura da massa sintética

A mistura foi transferida para a sinterização piloto (ver figura 4.5), equipada com quatro termopares distribuídos nas regiões do centro, base, caixa de vento, exaustor, vacuômetros e medidor de vazão dos gases gerados durante a sinterização. Há várias entradas de “ar falso” na tubulação do sistema para permitir o controle da velocidade da frente de reação formada durante a sinterização.



Figura 4.5 – Forno piloto sinterizador da Vamtec S/A.

Sobre a grelha do sinterizador piloto foram colocados 3kg de sinter para proteção da mesma. A massa anteriormente misturada na betoneira foi colocada dentro do forno e sobre ela foram adicionados cerca de 4kg de carvão vegetal (ver figura 4.6), com o objetivo de dar ignição à mistura a ser sinterizada.



Figura 4.6 – Carvão vegetal.

Posteriormente foi ligado o exaustor para promover a passagem de ar pela mistura. Acendeu-se então o carvão vegetal com auxílio de uma queimador a gás (ver figura 4.7) e deu-se início ao processo de sinterização que durou cerca de 30 minutos. A temperatura e a pressão interna do sistema foram controladas no intervalo de um em um minuto.



Figura 4.7 – Ignição do carvão sobre a massa sintética.

O forno foi então baluscado a 90°, ver figura 4.8, e a massa sinterizada foi depositada sob uma mesa e posteriormente enviada para britagem e peneiramento para

granulometria máxima de 70mm (ver figuras 4.9, 4.10 e 4.11) no Centro de Pesquisa da Vamtec.



Figura 4.8 – Basculamento do forno sinterizador.



Figura 4.9 – Remoção da escória sinterizada do forno.



Figura 4.10 – Peneiramento da escória.



Figura 4.11 – Escória sinterizada após briquetagem e peneiramento.

A escória sintética sinterizada foi amostrada, análises químicas e físicas foram realizadas para ajuste da composição da massa a ser sinterizada em escala industrial.

Baseado nas informações geradas na sinterização em escala laboratorial foi então promovida à sinterização em escala industrial na Vamtec (ver figura 4.12 e 4.13).



Figura 4.12 – Sinterização em escala industrial (Vê-se uma pá arrastando a escória).

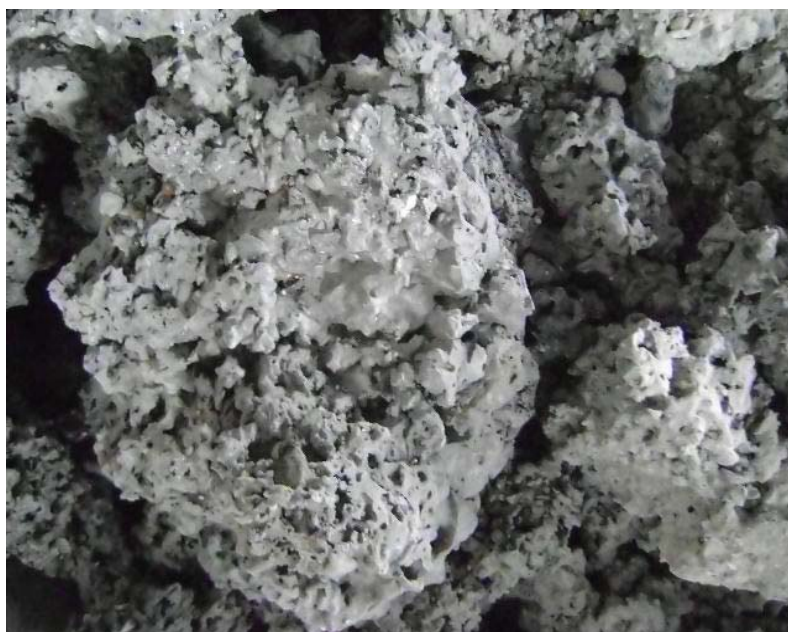


Figura 4.13 - Escória bruta após sinterização.

A escória sintética sinterizada foi britada e peneirada para atendimento da faixa granulométrica conforme especificação de 70mm máximo, sendo posteriormente

colocada em grandes sacos “big bags” e enviada para a aplicação na ArcelorMittal Inox Brasil (ver figuras 4.14 e 4.15).



Figura 4.14 – Escória sinterizada, britada e peneirada.



Figura 4.15 – Bag de escória sinterizada pronta para aplicação.

4.2.2 Fundentes e ligas

Visando o ajuste químico da escória foram adicionados na panela após vazamento do metal do convertedor MRPL, os fundentes como cal calcica e óxido de magnésio calcinado, com dimensão granulométrica entre 10 e 40mm e composição conforme tabela IV.2.

Após adição dos fundentes foram adicionados as ligas com especificação conforme tabela IV.3, para desoxidação do banho e ajuste da composição química do aço GO.

Tabela IV.2 - Composição química dos fundentes.

Composto	Cal calcica	Oxido de magnésio calcinado
CaO	> 89%	< 1,50 %
SiO ₂	< 2,50%	< 2,80 %
P	< 0,050%	< 0,050%
S	< 0,080%	< 0,080%
Al ₂ O ₃	< 1,00 %	< 1,00 %
Fe ₂ O ₃	-	< 2,80 %
MgO	≤ 5,0%	> 92,0 %

Tabela IV.3 - Composição química das ligas.

Composto	Especificação
FeSi Especial	> 75,0 % de Si
Si Metálico	> 98,0 % de Si
FeS	> 20,0 % de S

4.2.3 Aço silício de grão orientado

Para garantir as propriedades magnéticas no produto final, conforme tabela IV.4, o aço GO possui uma faixa estreita de composição química, que deve ser controlada rigorosamente durante sua etapa de elaboração na aciaria.

Tabela IV.4 – Especificação do aço GO para o produto totalmente processado, testado após recozimento.

Espessura (mm)	Designação ArcelorMittal Inox Brasil	Perda Magnética (W/kg)			
		1,5T		1,7T	
		50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
0,27	E004	0,85	1,12	1,24	1,63
0,3	E005	0,97	1,28	1,39	1,83

4.3 Procedimento experimental

Os experimentos foram realizados com o mesmo tipo de aço e conforme tabela IV.5.

Tabela IV.5 - Número de corridas testadas.

Experi_ mento	Especificação (%) em massa									Nº Corridas testadas
	Faixa	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	S	C _(fixo)	
A	Mínimo	20	20	0	0		0	0	0	3
	Máximo	50	50	10	5		10	1	2	
B	Mínimo	30	20	10	0	0	0	0	0	3
	Máximo	50	50	20	3,5	5	10	1	1	
C	Mínimo	30	20	0	0	0	0	0	0	5
	Máximo	65	40	15	2,5	8	12	0,5	1	
D	Mínimo	25	10	0	0	0	0	0	0	22
	Máximo	65	35	25	1,8	10	15	0,2	1	

4.3.1 Descrição do experimento

Os experimentos foram testados na seqüência apresentada na tabela IV5, sendo que cada novo experimento foi modificado em função dos resultados alcançados com o experimento anterior.

Para utilização da escória sintética sinterizada, denominada Vamflux RGO-SI, seguiu-se a seguinte forma:

após vazamento de aproximadamente 80t de aço do convertedor para a panela, conforme figura 4.16 e 4.17, adicionou-se a escória sinterizada em bag de 800kg (ver figuras 4.18 e 4.19), que permaneceu ali durante 2 minutos até a abertura do gás inerte (Ar) para agitação do banho por um período de 3 minutos. Amostras de escória e de aço foram então retiradas e enviadas para o laboratório da ArcelorMittal Inox Brasil para análise química. Depois foram adicionados os demais materiais, como as ligas de FeSi e FeS, passou gás (Ar) novamente por mais 4 minutos e em seguida a panela foi enviada para o equipamento VOD.

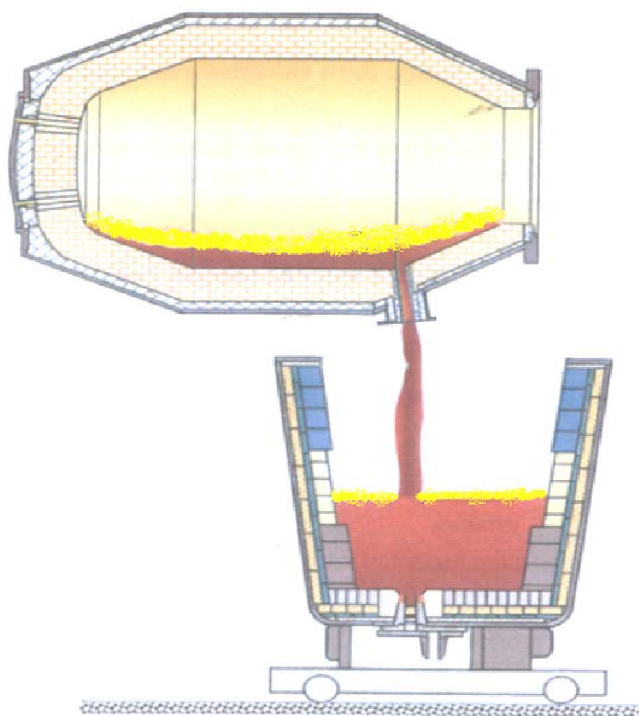


Figura 4.16 - Figura demonstrando o processo de vazamento do aço de um convertedor para a panela (RIZZO, 2006).



Figura 4.17 - Vazamento no convertedor MRPL.



Figura 4.18 – Adição de escória sintética em bag e ponte rolante.



Figura 4.19 – Adição de escória sintética em bag e ponte rolante.

No VOD o banho metálico foi submetido a um vácuo menor que 10mbar por um período mínimo de 5 minutos e feitas as adições complementares de FeSi. Após processo no VOD, foram coletadas as amostras de aço e escória e enviada para análise no laboratório químico, sendo a panela enviada para o Forno Panela.

No Forno Panela foram realizados os ajustes finais na composição química com adições de ligas e controle da temperatura, sendo retirado no final do processo amostras de aço e escória de panela.

Após liberação da panela para o lingotamento contínuo, deu-se por encerrado o experimento.

4.3.2 Utilização da escória sintética sinterizada no processo industrial

A utilização da escória sintética sinterizada na empresa ArcelorMittal Inox Brasil, seguiu duas etapas, sendo:

na primeira etapa da experiência foi adicionado na panela um bag de 800kg da escória sintética sinterizada após vazamento do aço do convertedor. Após adição foi promovida a agitação do banho metálico com argônio por um período de três minutos. adicionou-se então as ligas de FeSi e FeS, promovendo novamente a passagem do gás argônio para homogeneização do metal na panela por um período de quatro minutos.

Na segunda etapa a escória sintética sinterizada foi colocada em um silo (ver figura 4.20), adicionada junto com a liga de FeSi e fundentes via silo. Neste caso a passagem de gás inerte (argônio) ocorreu uma única vez após todas as adições, por um período de apenas três minutos (ver figura 4.21) e não 7 minutos como anteriormente. Este novo procedimento, o qual elimina a necessidade da adição de escória via ponte rolante, gerou um ganho de aproximadamente 8 minutos entre o MRPL e o VOD por corrida.

As formulações propostas foram testadas com adição conforme tabela IV.6.

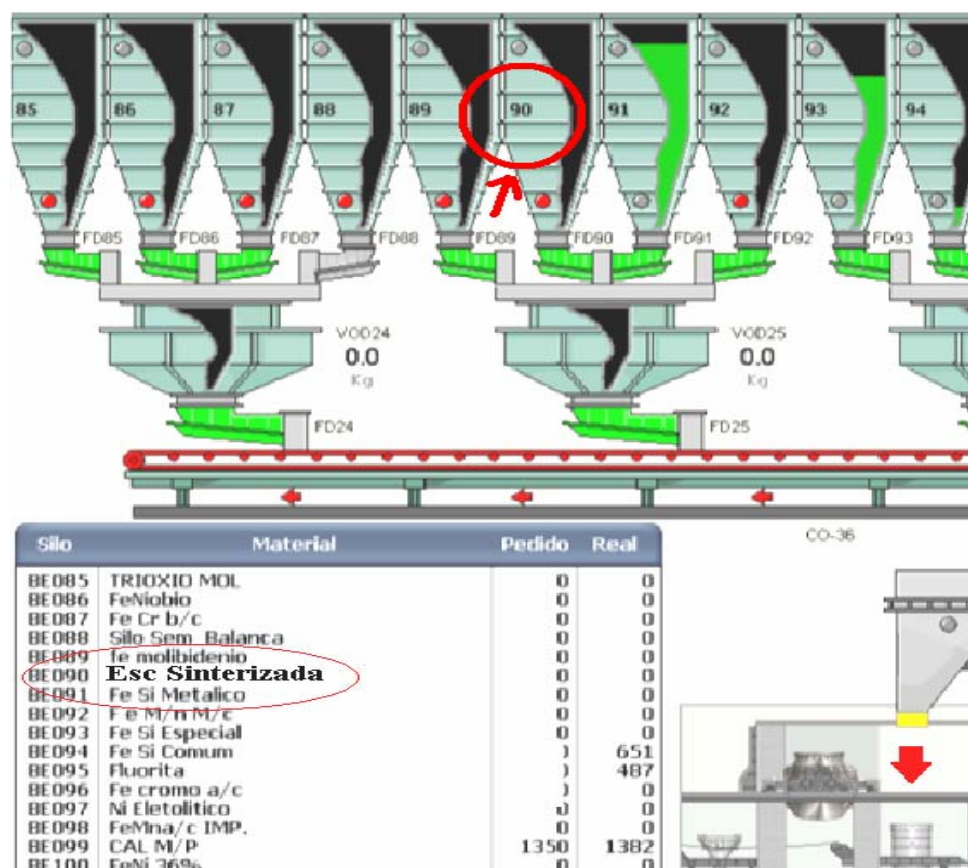


Figura 4.20 - Sistema de adição na panela via Silo.

Em ambas as situações a panela após adições foi enviada para a o VOD para redução do teor de hidrogênio e em seguida para o forno panela para ajustes da composição química e temperatura e posteriormente enviada para o lingotamento contínuo.

Após cada fase nos equipamentos, foi retirada uma amostra de aço e escória para análise química.



Figura 4.21 - Adição da escória, ligas e fundentes através do silo.

Tabela IV.6 – Forma de adição da escória na panela.

Experimentos	Adição via Ponte rolante	Adição via Silo
A	3 corridas	0
B	3 corridas	0
C	5 corridas	0
D	2 corridas	20 corridas

4.3.3 Amostragem de escória e aço na panela

Amostras de aço e escória foram coletadas na panela após vazamento do aço do convertedor, no VOD e no Forno Panela. Sendo que para retirada da amostra de escória foi introduzida uma concha na escória contida na panela e retirada a quantidade suficiente para análise (ver figura 4.22). Já para análise da composição química do aço foi introduzido um amostrador Ecil do tipo K para retirada de uma amostra de aço (ver figura 4.23). Ambas amostras foram enviadas para o laboratório químico informando o número da corrida e tipo de aço.

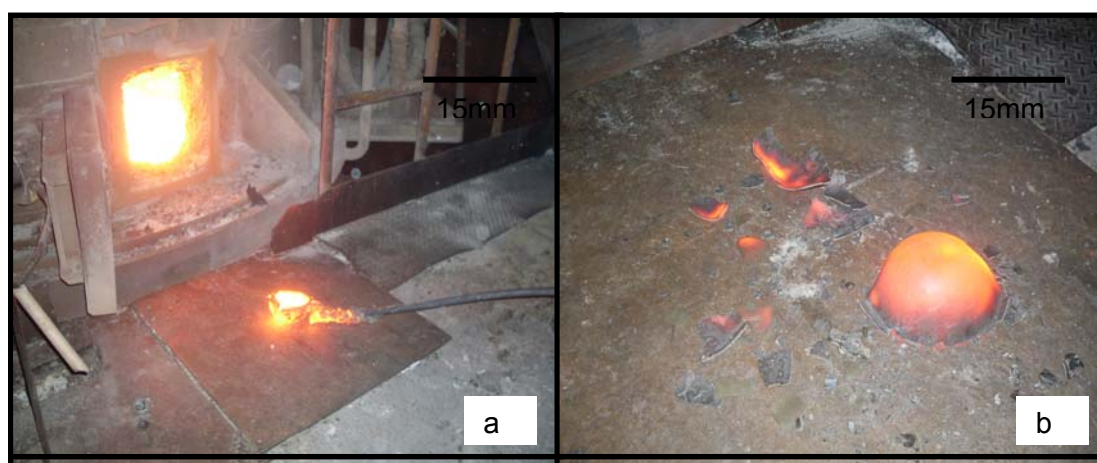


Figura 4.22: (a) amostra de escória no momento de sua retirada, (b) amostra segundos depois de sua retirada.

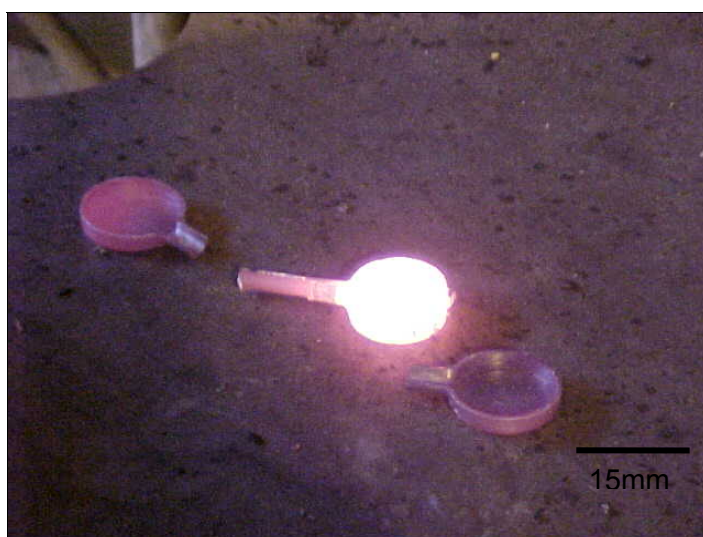


Figura 4.23: Amostra de aço segundos depois de sua retirada.

4.3.4 Preparação da amostra de escória para análise química

As amostras de escórias foram recebidas no laboratório instrumental na forma granulada e preparadas para análise na máquina automática Herzog (ver figura 4.24 e 4.25).

A máquina de preparo automático Herzog é composta por um britador, um moinho e uma prensa interligados.

Toda operação da máquina é realizada através do painel frontal com botões em tela *touch screen*. Os parâmetros de preparação da amostra foram configurados e memorizados na CPU da máquina.

O preparo da amostra quando iniciado seguiu as etapas de britagem, pulverização, adição de um comprimido de Acido Acetil Salicílico de 0,50g e finalmente a amostra foi prensada e liberada na correia de saída da prensa. A amostra foi recolhida, identificada e enviada para análise espectrométrica.



Figura 4.24 – Máquina de preparação de escória para análise química.



Figura 4.25 – Preparação da amostra de escória para análise, onde: (a) antes da preparação e (b) após a preparação.

4.3.5 Preparação da amostra de aço para análise química

A amostra recebida no laboratório foi inicialmente fixada numa morsa. Com uma furadeira equipada com broca de aço rápido de 9,5mm ou 12,5mm, pressionou-se a mesma contra a amostra, desprezando as primeiras limalhas e recolheu em bandeja aproximadamente 5,0g de limalha, perfurando no mínimo 2/3 do corpo da amostra. A amostra de limalha obtida foi colocada em envelope plástico devidamente identificado para análise gasométrica (C, S e N₂).

O restante da amostra foi usinada no torno CNC (ver figura 4.26), para remoção do óxido da superfície e enviado para análise no espectrômetro de RX, para análise química dos demais elementos importantes para o aço GO (ver figura 4.27).



Figura 4.26-Torno CNC para remoção da camada de oxido da amostra de aço.

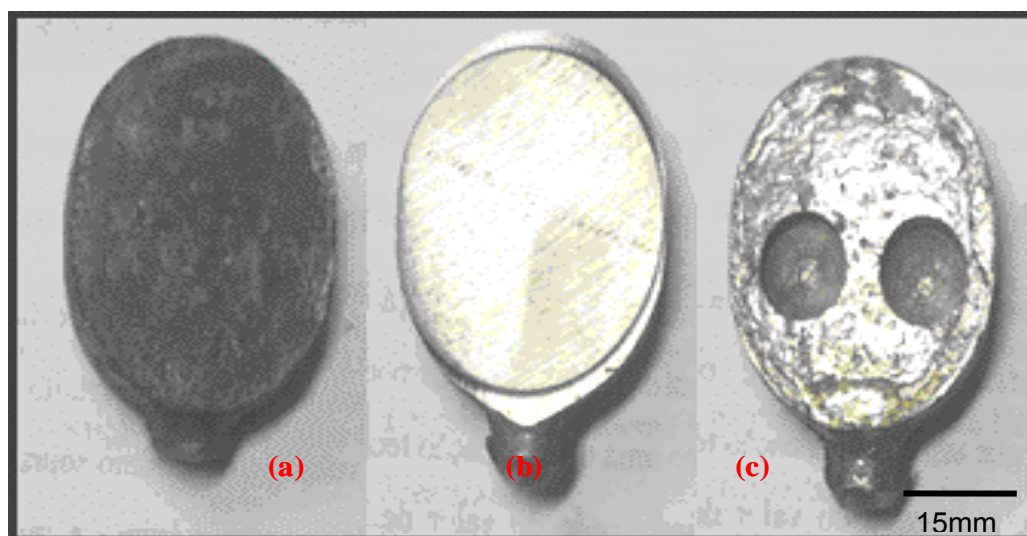


Figura 4.27 -(a) amostra com a superfície oxidada, (b) amostra preparada no CNC, (c) amostra perfurada para coletas de farpas.

4.3.6 Análises químicas realizadas

As matérias-primas utilizadas foram caracterizadas por técnicas de: análise química no espectrômetro de Raios-X, espectrômetro ótico no laboratório da ArcelorMittal Inox Brasil e no difratômetro de Raios-X no laboratório de caracterização tecnológico da USP SP, como se segue:

4.3.6.1 Análise química no espectrômetro de Raios-X

As amostras foram analisadas nos aparelhos Raios-X ARL-72000S ou PHILIPS-PW2600. A amostra usinada foi colocada dentro de um cassete de carregamento, centralizando e a fixando com a tampa equipada com uma mola, na região central do cassete, onde a amostra foi irradiada. O braço hidráulico subiu e vedou a câmara primária, imediatamente iniciou-se a formação de vácuo, que quando se igualou com a câmara secundária (aproximadamente 140mm de Hg), a válvula de segurança do "SHATTER" abriu, neste ponto a análise teve início. O tempo de análise foi de 37 a 40 segundos. Terminado este tempo o resultado foi mostrado na tela e impresso.

4.3.6.2 Análise química no espectrômetro de emissão ótica

As amostras foram analisadas nos aparelhos ARL 34000-245-244 ou ARL 4460-361. Selecionou-se primeiramente o programa analítico desejado, posicionou-se a amostra a ser analisada na câmara de centelhamento do espectrômetro sobre a mesa de queima de modo que o furo da mesma fosse completamente obstruído pela amostra, que foi presa através do dispositivo de fixação; iniciou-se então a queima e após o término da queima foi apresentada a média dos resultados. Uma análise crítica dos resultados foi realizada. Como parâmetro observou-se a aparência da queima (ver figura 4.28).

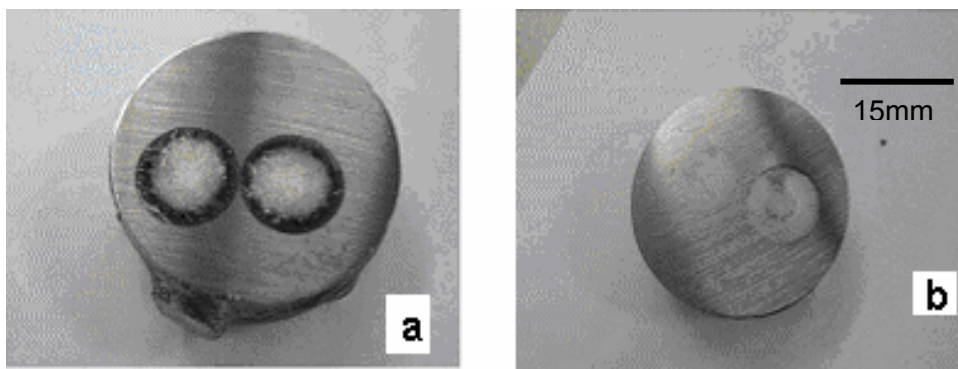


Figura 4.28 - Padrão de inspeção de Queimas, onde: (a) é a aparência queima boa e (b) aparência de queima com indicativo de problema no gás argônio.

4.3.6.3 Análise química por gasometria

As amostras foram analisadas nos aparelhos CS444/444LS, onde é escolhido o canal apropriado para o tipo de amostra e de acordo com as especificações operacionais do equipamento, ou seja, a observância das condições de célula para o elemento carbono, conforme manual do equipamento.

Inicialmente colocou o cadinho na balança acoplada ao equipamento, pesou a amostra procurando utilizar uma massa entre 0,50 e 1,00g. Adicionou o fundente a base de tungstênio e estanho, podendo ser colocado depois da pesagem da amostra. Identificou a amostra e retirou o conjunto cadinho, fundente e amostra da balança e transferiu para o forno HF-400 para análise química. A análise teve início e ficou concluída com o término da contagem de carbono e enxofre na tela. Ao término da análise de cada amostra, os resultados de carbono e enxofre, foram mostrados na tela automaticamente.

4.3.6.4 Análise difração de RX

A amostra foi primeiramente colocada dentro de moedora de Tungstênio e rotacionada numa velocidade de rotação de 350rpm; o tempo de moagem foi de 3 minutos com 2 repetições invertendo o sentido de rotação para propiciar melhor homogeneização da amostra, depois o material foi retirado da panela com o auxílio de uma espátula.

O pó foi então espalhado no anel do porta amostra com o auxílio de uma espátula e pressionado firmemente o pó para baixo utilizando um pistão. Usou-se uma lâmina de metal e um pincel para remover o excesso de amostra do anel, deixando a amostra pronta para a coleta de dados.

A análise de textura foi então efetuada utilizando o método do pó no difratômetro de raios X, marca Philips, modelo MPD 1880, com tubo de cobre e com potência de 40mA. A identificação das fases cristalinas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD (International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD _ PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

4.3.7 Análises físicas realizadas

As matérias-primas utilizadas foram caracterizadas por técnicas de: Sharp test e tamboramento no laboratório da ArcelorMittal Inox Brasil.

4.3.7.1 Teste de tamboramento

O teste de tamboramento foi realizado para medir a degradação relativa do material amostrado. O teste consistiu em recolher uma amostra de aproximadamente 30kg, secar a amostra em estufa a 110°C, durante 2 horas e aguardar resfriamento.

As amostras foram então peneiradas nas malhas de 50,8; 38,1; 25,4; 15,9; 12,7 e 9,52mm. Compondo uma amostra com peso total de 23kg, conforme ensaio granulométrico.

Foi então calculado o percentual retido em cada malha, onde:

$$\% \text{ Retida} = \frac{\text{peso retido na malha}}{\text{peso total}} \times 100$$

Em seguida foi calculada conforme equação 3.9, a composição da amostra:

$$M_1 = \left(\frac{R \times M_2}{100} \right) \quad (4.1)$$

Sendo:

M_1 = Peso a ser tomado da fração retida em cada malha para composição da amostra;

R = Percentagem retida em cada malha calculada;

M_2 = Peso da amostra a ser composta.

A amostra foi colocada novamente no tambor e procedeu 200 revoluções (25 rpm), após tamboramento a amostra foi pesada e efetuada o ensaio granulométrico, montando o conjunto de malhas com 50,8; 38,1; 25,4; 19,1; 15,9; 9,52; 6,35; 4,76mm e panela.

Após foi calculado o índice de tamboramento do sinter da seguinte forma:

$$I_T = \frac{\text{massa retido na malha acima de } 9,52\text{mm}}{\text{massa inicial da amostra}} \times 100$$

Onde I_T é o índice de tamboramento.

4.3.7.2 Shatter Test

O teste de queda consiste em medir o índice de degradação de um material através da queda livre desse material de uma altura de 1,80 metros. Inicialmente recolheu-se uma amostra de 40kg, secou a amostra em estufa a 110°C, durante 2 horas, deixando resfriar. O material foi então peneirado nas malhas de 50,8; 38,1; 25,4; 15,9; 12,7 e 9,52mm e composto uma nova amostra com peso total de 20kg. Foi então calculando o percentual retido em cada malha, conforme baixo:

$$\% \text{ Retida} = \frac{\text{massa retida na malha}}{\text{massa total da amostra}} \times 100$$

Em seguida foi calculada, conforme equação 3.10, a composição da amostra:

$$M_1 = \left(\frac{R \times M_2}{100} \right) \quad (4.2)$$

sendo:

M_1 = Peso a ser tomado da fração retida em cada malha para composição da amostra;

R = Percentagem retida em cada malha calculada;

M_2 = Peso da amostra a ser composta.

Colocou-se a amostra na caixa do equipamento de queda e procedeu quatro quedas no material. Após, foi efetuado o ensaio granulométrico utilizando as malhas de 50,8; 25,4; 19,1; 12,7; 9,52mm e peneira.

Foi então calculado o índice de queda do sinter da seguinte forma:

$$I_Q = \frac{\text{massa menor que 9,52mm}}{\text{massa inicial da amostra}} \times 100$$

I_Q = massa do material menor que 9,52mm x 100/ massa inicial da amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados obtidos com o desenvolvimento da escória sintética sinterizada serão abordados a seguir.

Para efeito de comparação dos resultados alcançados durante a realização dos experimentos e melhorias obtidas, serão considerados como referência, os resultados do ano de 2009, período de desenvolvimento do projeto.

5.1 Temperatura durante o processo de sinterização no forno piloto da Vamtec

A figura 5.1 descreve as curvas alcançadas durante o processo de sinterização em escala piloto no centro de pesquisa de Vamtec, onde pode-se ver que a temperatura máxima alcançada no processo de sinterização esta em torno de 1200°C medido na zona 2 do forno. A temperatura final de processo medida na caixa de vento foi de aproximadamente 250°C, temperatura esta considerada como referência para o fim do processo de sinterização.

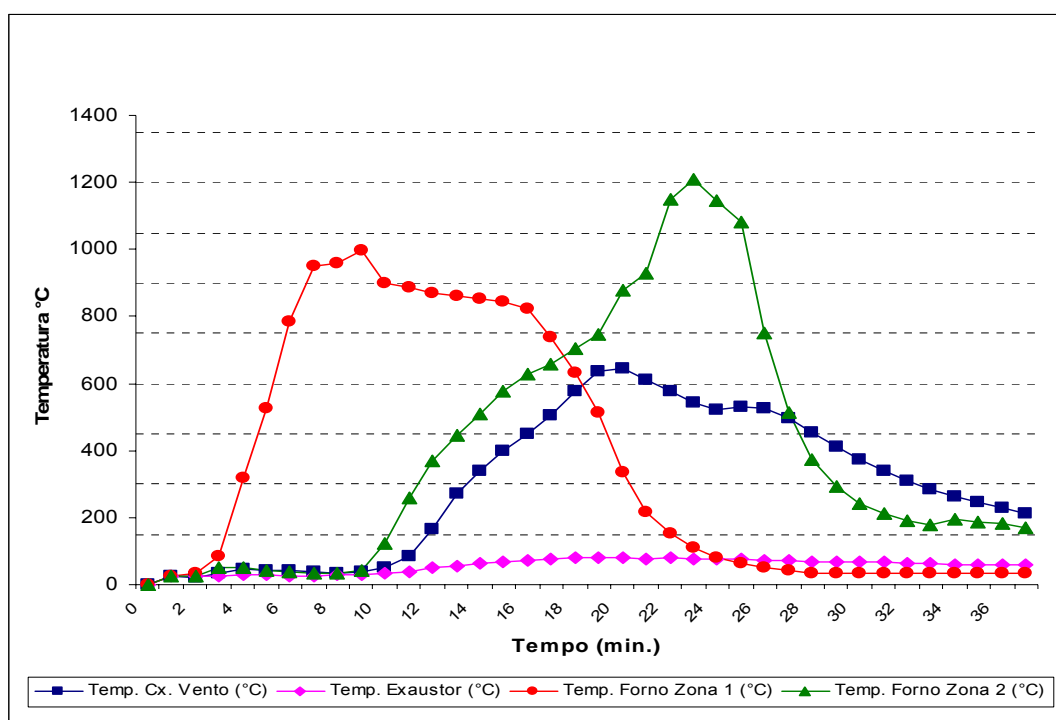


Figura 5.1 - Curva de temperatura no processo de sinterização.

5.2 Análise química da escória sintética sinterizada

As análises químicas da escória desenvolvida nos experimentos A e B, apresentaram um maior teor de carbono e alumina. Já nos experimentos C e D o teor destes elementos foi reduzido, conforme pode ser visto na tabela V.1.

Tabela V.1 - Composição química do carbono, enxofre e alumina da escória.

Experimento	C (%)	S (%)	Al ₂ O ₃ (%)
A	0,92	0,22	4,86
B	0,88	0,12	3,42
C	0,35	0,11	1,72
D	0,32	0,12	0,59

Durante o desenvolvimento de cada experimento em escala piloto no centro de pesquisa da Vamtec SA, as matérias-primas utilizadas para fabricação do sinter foram substituídas por materias mais nobres, garantido assim um maior estreitamento para o teor da alumina e do carbono presente na escória.

Aliado ao ajuste da composição química da matéria-prima, foi trabalhado também o ajuste no processo de sinterização, aumentando a capacidade de fluxo de calor no forno de sinterização, além do ajuste da granulometria final do sinter para no máximo 70mm.

Os resultados mostraram que alumina na escória acima de 1,5%, implica na ocorrência de maior teor de Al no aço final. Já o carbono na escória acima de 1% representa um pick-up de carbono no aço acima dos teores especificados.

5.3 Análise química do aço GO

Para visualização dos resultados, adotaram-se as faixas otimizadas para os elementos carbono, alumínio e enxofre. Observa-se na figura 5.2, que o carbono ficou acima do limite superior especificado para o aço GO, quando utilizamos o experimento A,

levando ao sucatamento desta corrida. A partir do experimento B, quando foi feito o ajuste no processo de produção do sinter para redução do teor de carbono na escória, o carbono encaixou na faixa, confirmando o acerto do ajuste da escória com os resultados nos experimentos finais.



Figura 5.2 – Teor de carbono final do aço GO.

Para o elemento químico alumínio, os resultados foram melhorando a partir do ajuste da escória (ver figura 5.3). Experiências durante a produção do aço GO na ArcelorMittal Inox Brasil na fase forno panela, tem revelado que a redução do teor de Al no aço esta diretamente ligado a redução do teor de Al_2O_3 na escória. Assim, foi ajustado o teor de Al_2O_3 na escória através da substituição das matérias primas C,E,F e redução de cerca de 50% da matéria prima H, ver tabela V.2.

O valor do teor de Al_2O_3 foi reduzido para 100% entre 0 e 1,8%, sendo 90% inferior a 1,0%. Quando comparamos os resultados de corridas produzidas com a escória anterior é possível perceber uma melhora no resultado, saindo de um desvio padrão de 0,0016% para 0,0009%, ver figura 5.4.

Tabela V.2 – Composição química das materiais primas para produção da escória sintética sinterizada.

Materia Prima	Al ₂ O ₃ (%)
A	0,278
B	0,436
C	6,168
D	0,687
E	3,490
F	3,188
G	0,557
H	2,013
I	0,363

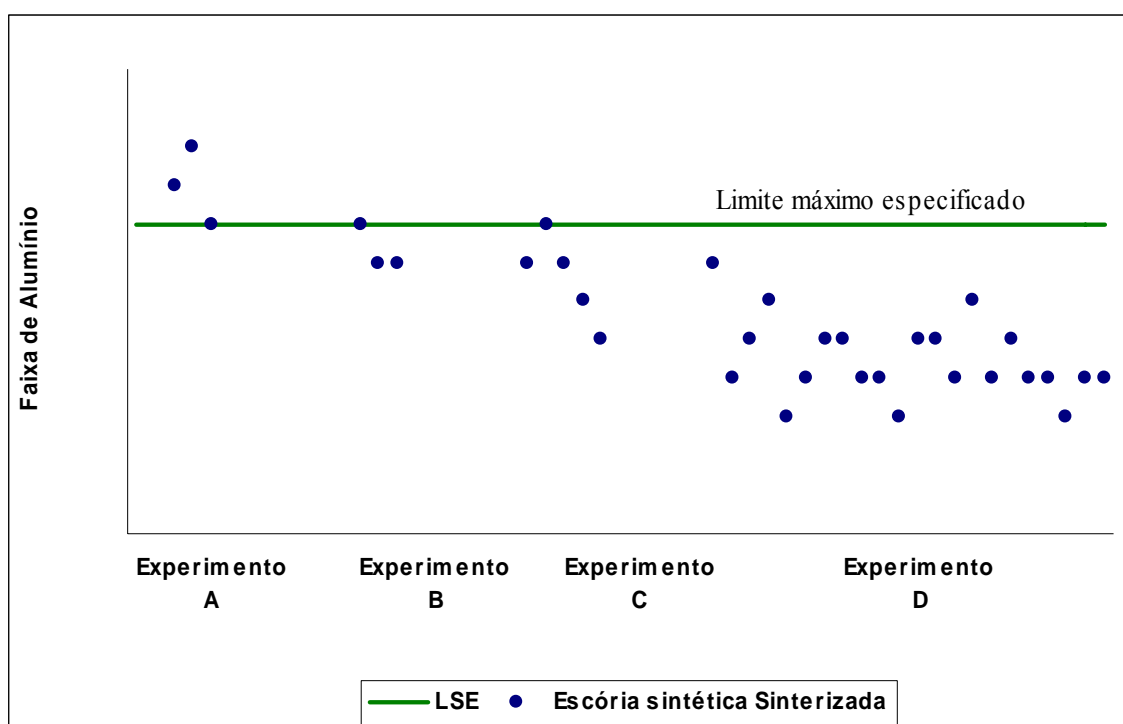


Figura 5.3 – Teor de Alumínio final do aço GO.

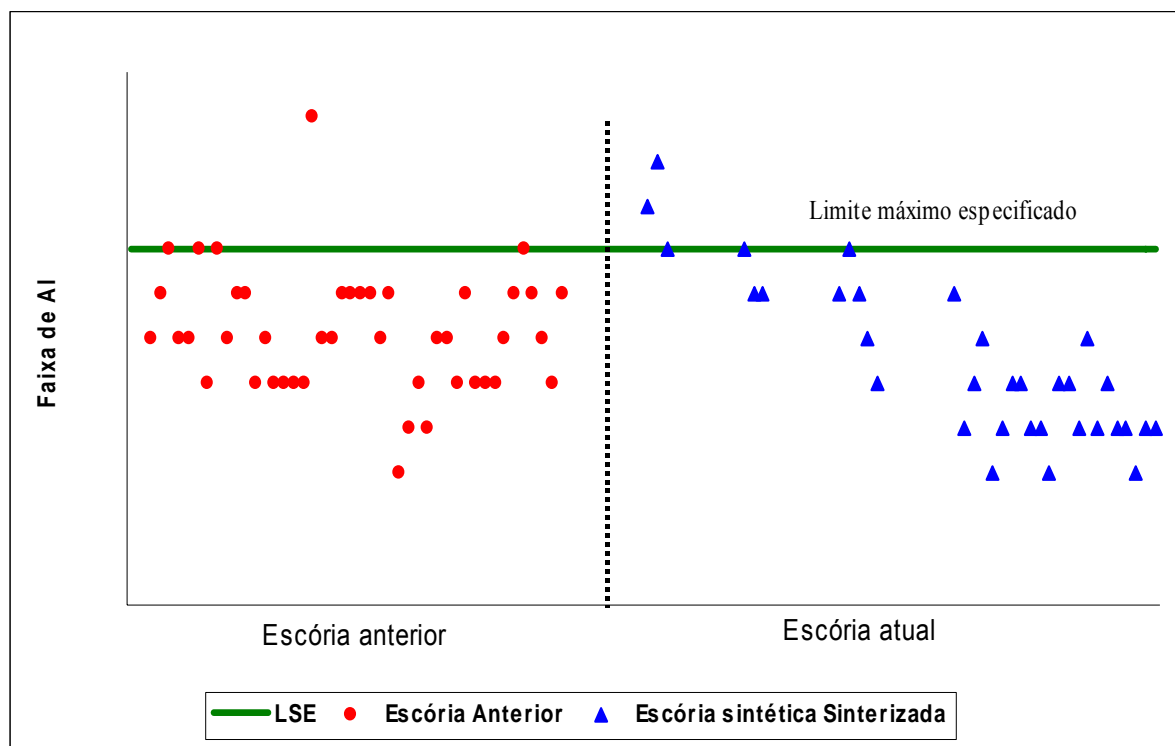


Figura 5.4 - Comparação entre a escória anterior e a atual.

Para o elemento químico enxofre, a escória sintética sinterizada, trouxe uma maior estabilidade ao processo. Saindo de um desvio padrão de 0,0028% para 0,0005%, o que pode ser observado na figura 5.5.

Quando comparada as duas escórias é possível verificar, a dificuldade encontrada na escória anteriormente utilizada para garantir o atendimento à especificação do teor de enxofre final no aço.

Pode-se verificar na figura 5.6, a ocorrência de quatro corridas abaixo da faixa mínima especificada, o que levou ao sucata destas corridas.

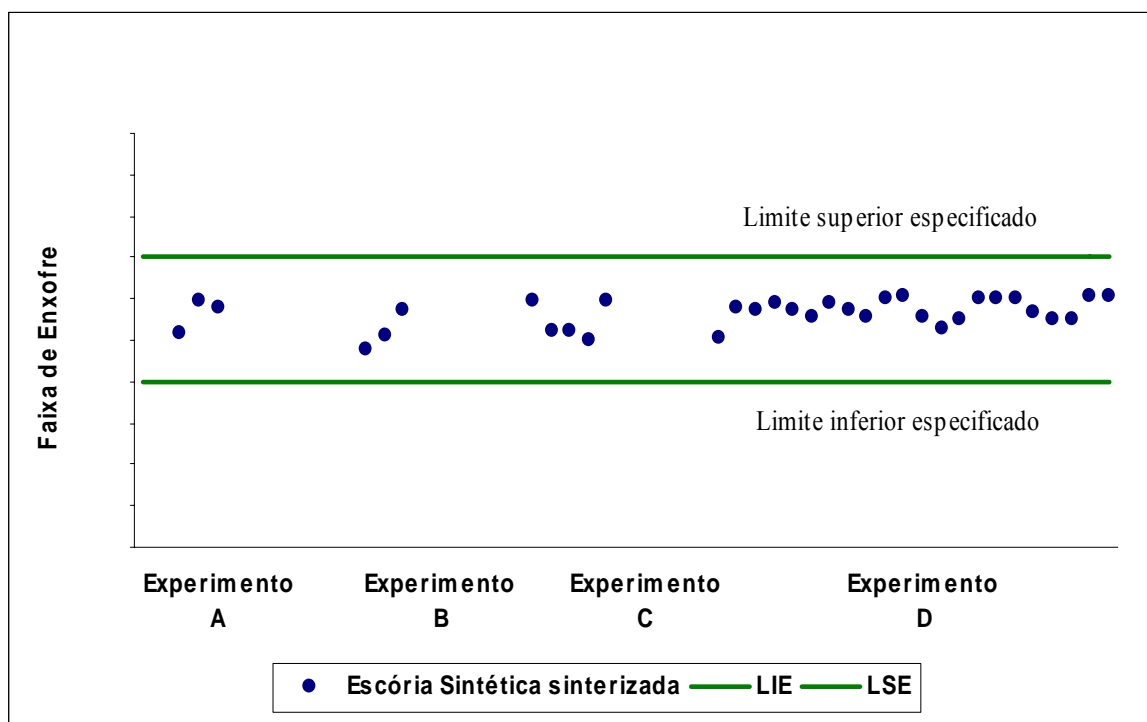


Figura 5.5 – Teor de enxofre final no aço GO.

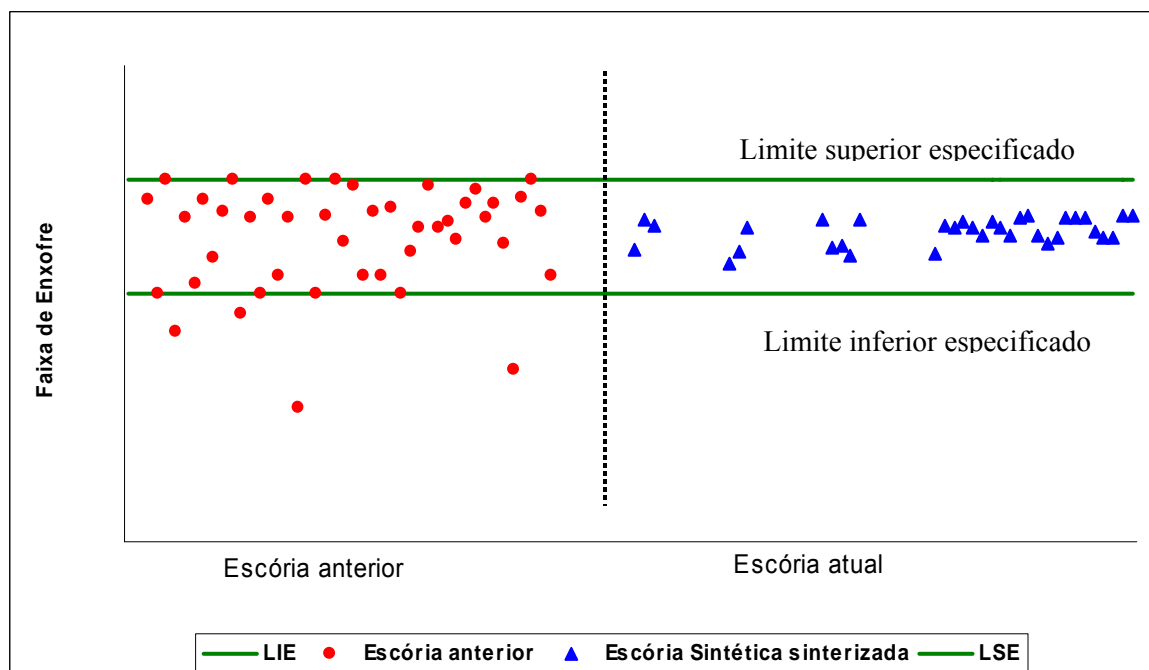


Figura 5.6 – Teor de enxofre com escória anterior e atual.

Houve uma redução em cerca de 50% do consumo de enxofre usado para ajuste da composição química final do aço no Forno Panela, como pode ser verificado na figura 5.7.

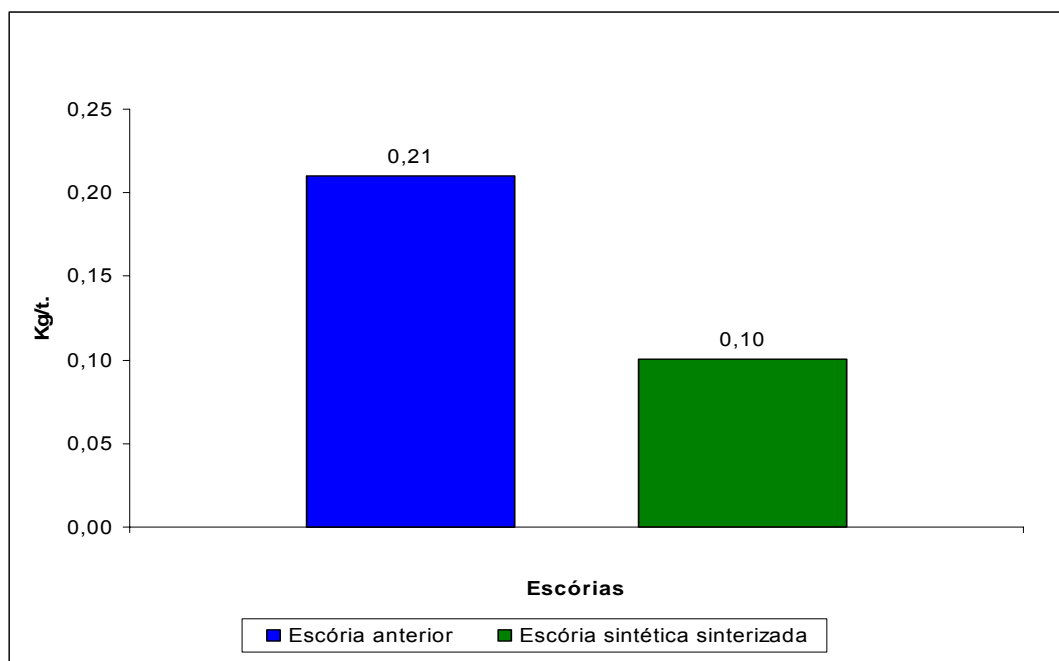


Figura 5.7 - Consumo de Enxofre no Forno Panela.

A estabilidade da escória desenvolvida pode ser explicada pelo cálculo termodinâmico da nova reação, onde o ΔG positivo indica que a reação não é espontânea no sentido indicado.

5.4 Análise química Difração-RX

A tabela V.3 e V.4, mostram as fórmulas combinadas do CaO.

Tabela V.3 - Dados Difração Raios-X.

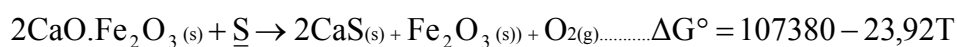
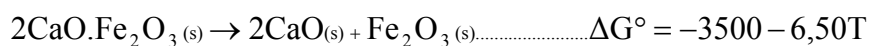
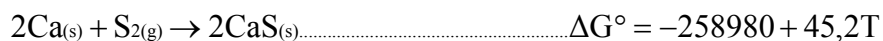
Nome Composto	Fórmula Química	Mineral
Lamita	Ca_2SiO_4	Larnite
Fluorita	CaF_2	Flourita
Periclásio	MgO	Periclásio
Srebrodolskita	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	Srebrodolkita
Calcita	CaCO_3	Calcita
Coesita	SiO_2	Coesita

Tabela V.4 – Formula combinada do CaO com óxido de Fe e Si.

Fórmula Química
$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$
$2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$

Baseado nestas informações foi realizado o cálculo termodinâmico para verificação do efeito dessulfurante desta escória, conforme pode ser visto a seguir.

5.5 Cálculo termodinâmico da escoria sintética sinterizada



$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$$

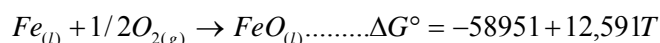
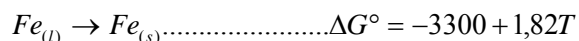
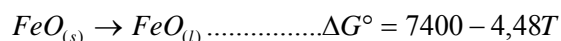
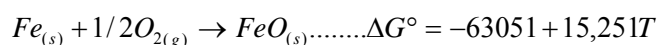
$$\Delta G = 107380 - 23,92T + RT \ln \left(\frac{a(\text{CaS})^2 \times a\text{Fe}_2\text{O}_3 \times P_{\text{O}_2}}{h_s \times a(2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)} \right)$$

Fonte: Dados termodinâmicos para metalurgistas (Carvalho-1977)

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$$

$$\Delta G = 123480 - 16,50T + RT \ln \left(\frac{a \cdot (\text{CaS})^2 \times a \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \times P_{\text{O}_2}}{hS \times a \cdot (2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)} \right)$$

Cálculo do P_{O_2} (equilíbrio Fe/FeO)



$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$$

$$\Delta G = 0 \text{ Equilíbrio, então } \Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K$$

$$0 = \Delta G^\circ + RT \ln \left(\frac{a_{FeO}}{a_{Fe} \times P_{O_2}^{1/2}} \right)$$

onde :

$$a_{FeO} = 0,3 \text{ (Fonte : Slag atlas - 1995)}$$

$$a_{Fe} = 1$$

$$0 = -58951 + 12,591T + 1,9872 \times 1873 \times \ln \left(\frac{0,3}{1 \times P_{O_2}^{1/2}} \right)$$

$$P_{O_2} = 4,99 \times 10^{-3} \text{ atm.}$$

Considerando então:

$$a_{CaS} = 1$$

$$a_{Fe_2O_3} = 0,3 \text{ (Fonte Slag Atlas - 1995)}$$

$$a(2CaO.Fe_2O_3) = 1$$

$$P_{O_2} = 4,99 \times 10^{-3} \text{ atm.}$$

$$h_S = f_S \times \%S$$

$$\log f_S = e_S^s \times \%S$$

$$\log f_S = -0,014$$

$$f_S = 0,96827$$

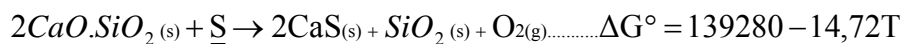
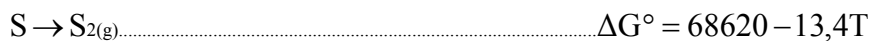
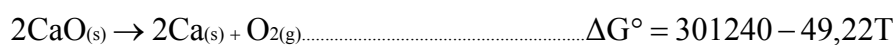
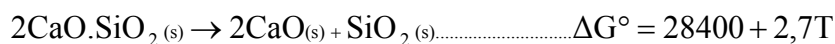
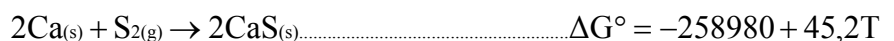
$$h_S = f_S \times \%S$$

$$h_S = 0,048$$

$$\Delta G = 107380 - 23,92 \times 1873 + 1,9872 \times 1873 \times \ln \left(\frac{0,3 \times 4,99 \times 10^{-3}}{0,048} \right)$$

$$\Delta G = 49670,83 \text{ cal/mol.}$$

Como $\Delta G > 0$, a reação nas condições acima estabelecidas não ocorre no sentido indicado, determinado assim que não ocorrerá dessulfuração do aço pela escória.



Fonte: Dados termodinâmicos para metalurgistas (Carvalho-1977) e
Physical Chemistry of High Temperature Technology TURKDOGAN (1980).

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q$$

$$\Delta G = 139280 - 13,4 + RT \ln \left(\frac{a(\text{CaS})^2 \times a\text{SiO}_2 \times P_{\text{O}_2}}{h\text{S} \times a(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)} \right)$$

Onde:

$a\text{SiO}_2$ = atividade raoultiana do SiO_2

$a\text{CaS}$ = atividade raoultiana do CaS

$a(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ = atividade raoultiana do $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

P_{O_2} = Pressão parcial do O_2 no equilíbrio

$h\text{S}$ = atividade henriana do S

Considerando então:

$$a\text{CaS} = 1$$

$$a\text{SiO}_2 = 0,0011 \text{ (Fonte Dados Termodinamicos)}$$

$$a(2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$$

$$P_{\text{O}_2} = 4,99 \times 10^{-3}$$

$$h\text{S} = 0,048$$

$$\Delta G = 139280 - 13,4 \times 1873 + 1,9872 \times 1873 \times \ln \left(\frac{0,0011 \times 4,99 \times 10^{-3}}{0,048} \right)$$

$$\Delta G = 80399,91 \text{ cal/mol.}$$

Como $\Delta G > 0$, a reação nas condições acima estabelecidas não ocorre no sentido indicado, determinado assim que não ocorrerá dessulfuração do aço pela escória.

5.6 Shatter test

O Shatter test mostrou um índice de queda LTQ igual a 14,67%, o que ser visto na tabela V.5

Tabela V.5 - Resultado Shatter test.

Milímetros das Peneiras	%
50,8	0
38,1	3,42
25,4	29,1
15,9	35,39
12,7	11,35
9,52	6,04
PANELA	14,67

5.7 Teste de tamboramento

O Índice de queda LTQ no teste de tamboramento foi igual a 34,66% e índice de tamboramento igual a 65,34%, o que ser visto na tabela V.6.

Tabela V.6 - Resultado teste de tamboramento.

Milímetros das Peneiras	%
50,8	0
38,1	0
25,4	9,98
19,1	15,50
15,9	11,98
9,52	27,83
6,35	12,12
4,76	5,09
PANELA	17,45

5.8 Desgaste do refratário da panela

Como forma de medir o desgaste do tijolo refratário das panelas, foi adotado o cálculo do teor de MgO adicionado na panela comparado com os teores de MgO na escória retirados no forno panela antes do lingotamento contínuo. Como pode ser observado na tabela V.7, não houve aumento significativo do teor de MgO na escória de panela, caracterizando assim que a escória não provocou o desgaste da panela (ver figura 5.8).

Tabela V.7 - Resultado análise MgO da escória.

Experimento	MgO inicial (%)	MgO Final (%)		
		Médio	Máximo	Mínimo
A	17,5	17,1	17,6	16,7
B	18,0	17,5	17,6	17,3
C	18,8	18,5	19,5	17,7
D	18,8	17,9	19,2	16,2

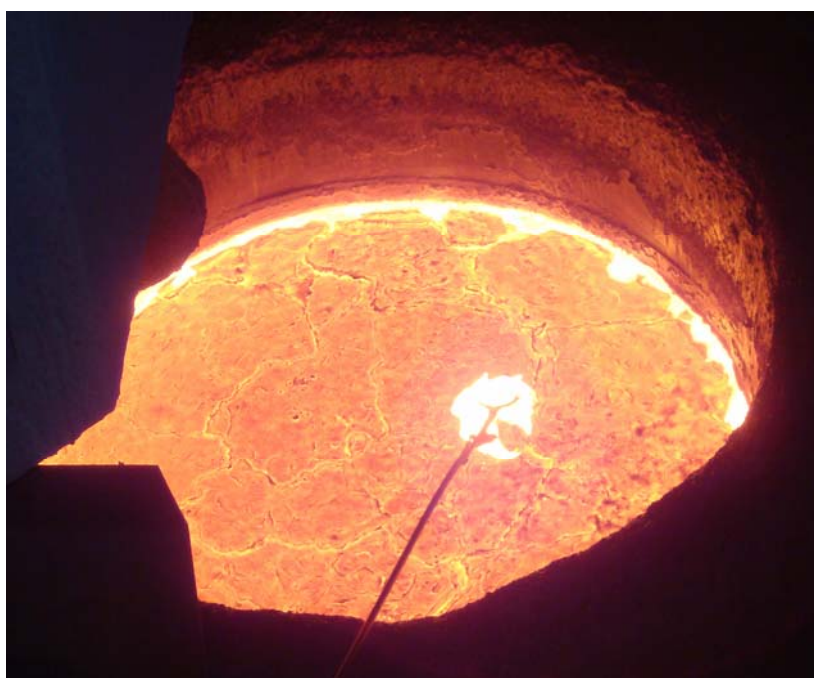


Figura 5.8 Escória final do processo.

A basicidade binária foi objetivada entre 0,60 a 1,00, sendo os resultados demonstrado na figura 5.9.

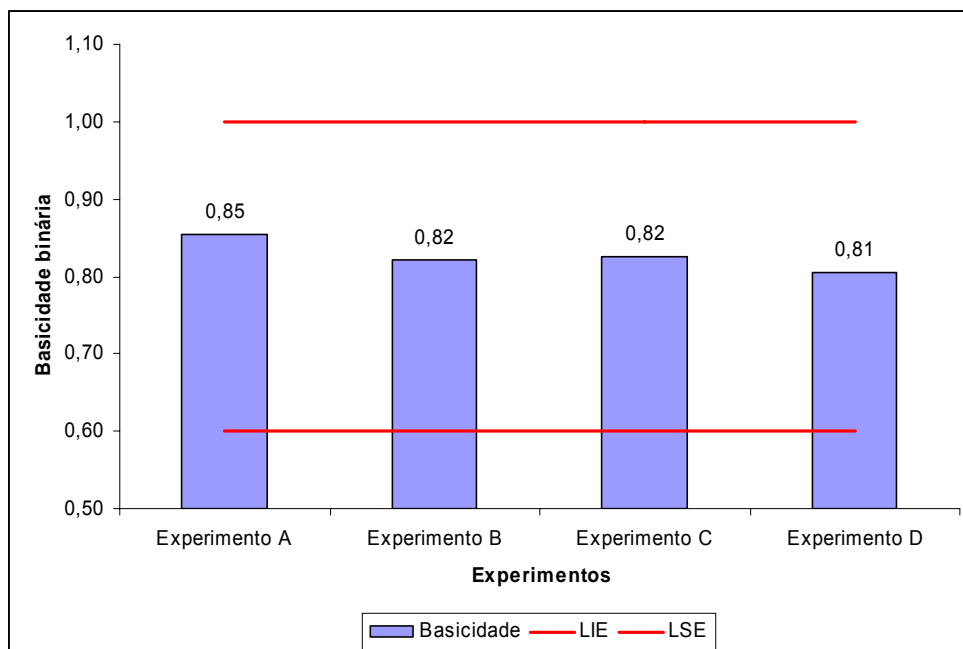


Figura 5.9 –Controle de basicidade binária de escória na panela (CaO/SiO_2).

6 CONCLUSÕES

1. Os testes experimentais em escala laboratorial realizados no Centro de Pesquisa da VAMTEC SA permitiram ajustar as composições químicas das matérias- primas e o processo de fabricação do sinter para obtenção de uma escória sintética sinterizada com qualidade que atendesse a aplicação final.

2. A combinação química entre o CaO e outros óxidos na escória sintética sinterizada (Fe_2O_3 , SiO_2) permitiu eliminar a adição de enxofre na escória sintética, devido à característica não dessulfurante dos novos compostos ($2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) de cal na escória sinterizada.

3. Reduziu-se em 100% o risco de sucata de corridas por fora de faixa especificada em enxofre, devido a estabilidade alcançada para o enxofre durante a produção do aço GO na aciaria com a utilização da escória sintética sinterizada.

4. Houve uma redução em 50% na necessidade de adição de enxofre no forno panela, demonstrando a ação não dessulfurante da escória.

5. O ensilamento da nova escória trouxe uma maior agilidade no processo, com ganho de aproximadamente 8 minutos por corrida para liberação para o VOD. Não é mais necessário aguardar a ponte rolante com o bag de escória para adicionar na panela, eliminando assim o transporte de bags de escória via caminhão até a área de aciaria e posterior transporte via ponte rolante para adição na panela, tornando o processo mais rápido e seguro.

6. A adição da nova escória via silo permitiu uma menor perda de temperatura, pois a escória é adicionada junto com a liga, passando gás na panela uma única vez durante três minutos e não duas vezes como anteriormente totalizando 7 minutos.

7. A estabilidade da composição química final no forno panela, permitiu um maior estabilidade do processo, garantido uma menor necessidade de acertos e por consequência uma redução no tempo de processo no forno panela.

8. Os teores de alumínio final no aço GO foram reduzidos em aproximadamente 15%, garantindo mais qualidade ao produto final.

9. O ajuste da composição química da escória, incluindo o controle da basicidade e o teor de MgO permitiu um menor desgaste do revestimento refratário da panela.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Fazer um estudo da relação entre basicidade ótima e saturação em MgO na escória.
2. Estudar e descrever os mecanismos cinéticos que envolvem a incorporação de alumínio no aço GO, definindo o teor crítico de alumina da escória global formada no processo durante a produção do referido aço, com a utilização da escória sintética sinterizada.
3. Estudar e descrever termodinamicamente a influência do vácuo na dessulfuração do aço GO nas condições da ArcelorMittal durante produção do aço GO.
4. Avaliar o desgaste refratário da panela variando-se a basicidade binária da escória global.
5. Determinar para qual vazão de gás e para qual espessura de escória o aço líquido não ficaria exposto, sem comprometer a homogeneidade e propriedades deste e para possibilitar a eliminação do processo VOD.
6. Estudar e correlacionar a quantidade, composição química e temperatura da escória passante do convertedor MRPL durante a produção de aço GO com o aumento dos teores de Al e Ti do aço.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTIER, J. ***Aglomerção e redução de minérios de ferro***. ABM – metalurgia, v.21, nº89, p. 275-294, Abril 1965.

ATHAYDE JÚNIOR, João Domingos Guimarães de. ***Otimização da injeção de gás inerte no Convertedor MRP-L***. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BARRIOS, S.R.; et al. ***Considerações metalúrgicas a respeito da utilização de escórias sintéticas em forno panela***. Seminário sobre fusão, refino e solidificação dos aços: aciaria, refratários, fornos elétricos, ferro-liga e fundição, 26, 1994, Salvador. 1994. P.287-304.

BOUCRAT, M. e ROCHAS, R. ***L' agglomération sur Grille des Minerais de Fer-Revenue de Metallurgie***, 65° ano, nº 12, p.835-844 dezembro 1968.

CAPODILUPO, D; MASUCCI, P; BRASCUGLI, G; DE ANGELIS, V., ***Operating Improvements in Electric Steel Production on the Terni EAF After Introduction of Slag Foaming Practice.IISC***. The Sixth International Iron and Steel Congress. Vol. 4. Steelmaking II; Nagoya; Japan; 21-26 Oct. 1990. pp. 98-104. 1990

CARVALHO, J. L R, et al. ***Dados Termodinâmicos para Metalurgias***, Departamento de engenharia Metalúrgica da UFMG, Fevereiro de 1977, Belo Horizonte, MG.

CASTRO, Luiz Fernando Andrade de; SAMPAIO, Ronaldo Santos; TAVARES, Roberto Parreiras. ***Termodinâmica metalúrgica***. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1985.

CBIE, ***A demanda de energia elétrica no Brasil***, <<http://www.cbie.com.br>>2008 (acessado em março de 2008).

CUNHA, ADRIANO FERREIRA DA. ***Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos*** [manuscrito] – UFOP - 2006.

DELLA, V. P., JUNKES, J. A., KUHN, I., HIELLA, H. G., HOTZA, D. ***By-product Utilization of Metallic Recovering of Stainless Steel Slags in The Ceramic Pigments Synthesis: Raw Material Characterization***. *Cerâmica*, 2005, vol. 51, n. 318.

FRUEHAN, C. L. Nassaralla, ***A Kinetic Model Demonstrating the Effect of FeO in the Slag***, Transactions of ISS of AIME, August 1998, p. 59-68. 203.

GRICE, M.A.K E DAVIES,W. ***Towards faster sintering of Ironstone***- Journal of the iron and institute, v. 175, p. 155-160, Outubro 1972.

HOLAPPA, Lauri E. K. ***Review of ladle metallurgy***, Scandinavian Journal of Metallurgy, 1980, pág.261.

HSIEH, L. H.; WHITEMAN, J. A. ***Effect of Oxygen potential on mineral formation in lime-fluxed iron ore sinter***. ISIJ International, v. 29, p. 625-634, 1989.

KRÜGER, P. et al. ***Evaluation of physicochemical aspects and optimization of slag practice in the refining procedures of grain oriented silicon steel and ultra low carbon steels in some of the steel plants in Brazil***. International conference on molten slags, fluxes and salts, Proceedings. Stockholm, Helsinki. 2000. 18 p.

MANCIO, M. **Contribuição ao Estudo do Fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2001.

MARTINS, A.A.R. et al. **Desenvolvimento de Processo para Fabricação de Aços de Elevada Limpeza Interna na Companhia Siderúrgica Nacional**, Metalurgia e Materiais: Materiais, Fusão, Refino e Solidificação de Metais, v. 58, N. 2, ABM N. 520, 2002.

MENEZES, O. S., et al, **Modernização da sinterização da belgo arcelor - usina monlevade**, X Seminário de Automação de Processos, 04 a 06 de outubro de 2006, Belo Horizonte, Minas Gerais.

NOLASCO SOBRINHO, P.J.; et al. **Fabricação de escória sintética para tratamento de aço silício de grão orientado da Acesita**. Congresso anual da ABM, 55, 2000, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM. 2000. p. 979-986.

NOLASCO SOBRINHO, P.J.; et al. **Fundamentos para fabricação de escória sintética utilizada no tratamento de aço no forno panela**. Seminário de fusão, refino e solidificação dos metais, 31, 2000, Vitória. São Paulo. 2000. p.491-501.

RIBEIRO, D. B et al; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. **Refino Secundário dos Aços**; Cursos ABM; Programa de Educação Continuada, 2007.

RIZZO, ERNANDES MARCOS DA SILVEIRA, **Introdução ao Processos de Refino Secundário dos aço**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo - 2006.

SANBONGI, K. *sintering of oxide particles on the inner surface*, vol. 74, pp. 308–322. Chemical Engineering, National Taiwan University, Taipei, 1966

SILVA, A. L. V. C.; *Termodinâmica Aplicada a Aciaria, Desfosforação de aço, Aciaria, Desfosforação, Termodinâmica*, UFF (Universidade Federal Fluminense) (1998).

SLAG ATLAS, Verlag Stahleisen GMBH, Dusseldorf, fevereiro 1981 pág. 5,139.

SLAG ATLAS, Verlag Stahleisen GMBH, *Slag Atlas*, Dusseldorf Setembro 1995 Segunda Edição (Reprint Without change - 2008), pág 127.

TAKANO, CYRO, *Estudo da influência de alguns Combustíveis na sinterização de minério Hematítico*, Tese apresentada escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1970.

TURKDOGAN, E.T. *Fundamentals of Steelmaking*. 1. ed. Cambridge: The Institute of Materials, The University Press. 1996.

TURKDOGAN, E.T. Physical Chemistry of High Temperature Technology. University Academic Press cap.1, Fundamental- tab 1.2 1980.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, J. B.; MONTERIRO, S. N., *A sinterização convencional de minérios*. Laboratório de Microscopia Digital da PUC-Rio (LMD), RJ 2003.

VOICE, E. W, et al, *Factors controlling the rate of sinter Production*, Journal of the iron and steel Institute, v.175, parte 2, p. 970152, outubro de 1953.

WENDERBORN, H.B – ***Sintering as a physical process***- Journal of the iron and steel institute, v. 175, parte 3, p.280, novembro 1953.

WSCIEKLICA, J. – ***Aspectos térmicos da sinterização com carvão vegetal***- ABM, boletim, v. 18, nº73, pp 939-935, Novembro 1962.

9 BIBLIOGRÁFIA

ASHIZUKA, M.; et al. ***The rate and mechanism of the silicon transfer between molten slag and metal.*** Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v.12, n.5, p.383-92,.1974

CAMPOS, V. F. ***Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido: Fundamentos: A Desfosforação.*** 3a Edição. Belo Horizonte: UFMG, 1985. v. 1. p. 141-163;

CRESCENT, R.; RIGAUD, M.. ***The influence of slag composition on the corrosion of basic refractories.*** international symposium on metallurgical slags, 1980, halifax. 1980. v.1. 242-250 p

FAULRING, G. ***Inclusion modification with slag in Si-killed steels IAS Steelmaking*** Seminar and 2nd ISS Argentina Section Meeting Nov 2-5, 1999, Buenos Aires, Argentina.

GILCHRIST, J. D.. ***Extraction Metalurgy.*** Thermodynamis - Aplications. Second Edition, 1980, United Kingdon. Published by Pergamon Press. p. 168-171;

GUGLIERMINA, P.. ***Désulfuration de l'acier en poche par brassage avec un laitier synthétique.*** Révue de Metalurgie-CIT, v.77, n.8/9, p.689-697, août/sept.. 1980

JONES, N.W.; et al. ***Slag/metal interactions during furnace tapping operations.*** international conference on molten slags, fluxes and salts, 6, 2000, stockholm, helsinki. Proceedings. Stockholm, Helsinki. 2000. 23 p.

Karnovsky, M., ***Improvement in Output and Quality of Electric Steel by the Injection of Powdered Slag Forming Materials***. Neue Hutte. Vol. 20, no. 5-6, pp. 310-316. May-June 1975

PASSOS, S.R.M.; et al. ***Desoxidacao da escoria da panela***. In: Seminário sobre fusão, refino e solidificacao dos cós, Aciaria e Refratários, Fornos Elétricos, Ferro-Ligas e Fundição, 26, 1994, Salvador. 1994. 671-687 P.

RIAZ, S; MILLS, K C; BAIN, K., ***Experimental examination of slag/refractory interface Ironmaking and Steelmaking*** (UK). Vol. 29, no. 2, pp. 107-113.

RIETZ, L; SCHULZ, P; HINZE, M; PAPROTNY, G., ***The perfecting of steel pouring by the addition of a synthetic slag***. Neue hutte. vol. 12, no. 12, pp. 714-718. dec. 1967

ROCHA, C.P.; TRAVASSOS JR., M.L.. ***Estudo do poder desfosforante e dessulfurante das escórias para elaboração de aço microligado***. In: seminário sobre aciaria, refratários e fornos elétricos, 1990, são paulo. aciaria, refratários e fornos elétricos. São Paulo: ABM 1990

10 ANEXOS:



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-030 São Paulo - SP e-mail: lct@lct.poli.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151 FAX: (0XX11) 3091-6037 www.lct.poli.usp.br



RESULTADO DE IDENTIFICAÇÃO DE FASES POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

CERTIFICADO: 269/09

DATA: 09/06/2009

CLIENTE: VAMTEC S/A

AMOSTRA: 176

IDENT. LCT: 183-0699 HPF

1. MÉTODO

O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca Philips, modelo MPD 1880.

A identificação das fases cristalinas, abaixo discriminadas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

2. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão listados na tabela abaixo:

ICDD	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral	Obs
00-033-0302	Larnita	Ca ₂ SiO ₄	Larnita	
01-075-0363	Fluorita	CaF ₂	Fluorita	
00-002-1207	Periclásio	MgO	Periclásio	
01-071-2108	Srebrodolskita	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Srebrodolskita	
01-072-1650	Calcita	CaCO ₃	Calcita	
01-083-1413	Coesita	SiO ₂	Coesita	

Nota: pp = possível presença

Em anexo é apresentado o difratograma obtido (cor vermelha), onde são assinaladas as linhas de difração correspondente(s) à(s) fase(s) identificada(s) (cada fase em uma cor distinta).

Juliana Livi Antonassi
Juliana Livi Antonassi
Pesquisadora do LCT – EPUSP

Dra. Maria Manuela Lé Tassinari
Dra. Maria Manuela Lé Tassinari
Pesquisadora do LCT – EPUSP

Prof. Dr. Henrique Kahn
Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT



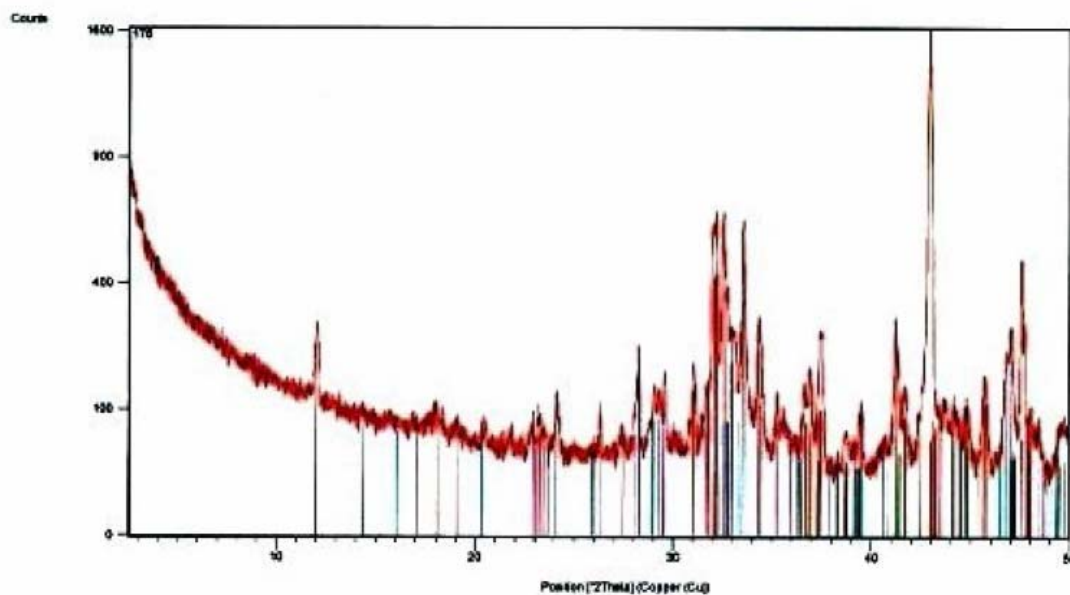
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT

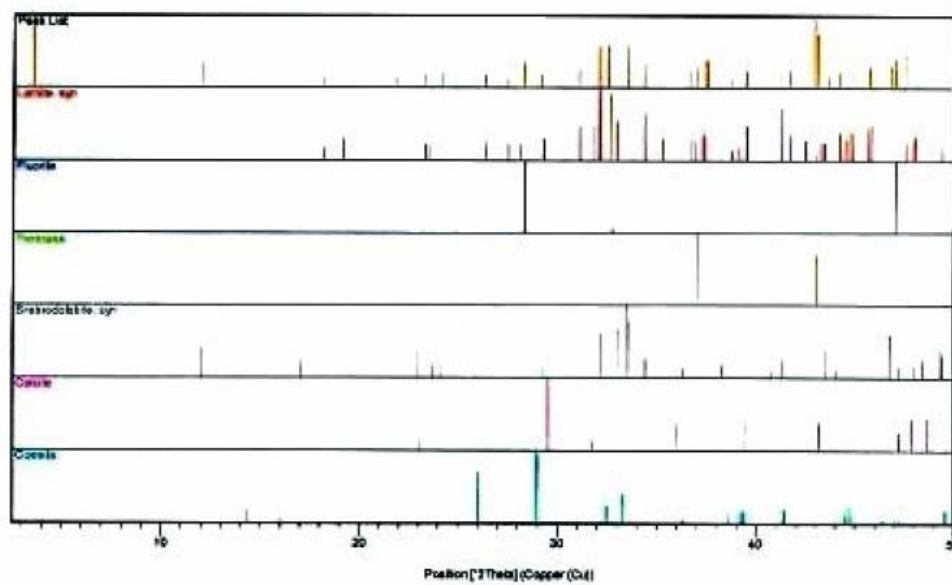
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-030 São Paulo - SP e-mail: lct@lct.pol.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151 FAX: (0XX11) 3091-6037 www.lct.pol.usp.br



DIFRATOGRAMA DE RAIOS X



FASES IDENTIFICADAS



Variáveis do processo de sinterização piloto.

Tempo (min)	Temp. Cx. Vento (°C)	Temp. Exaustor (°C)	Temp. Forno Zona 1 (°C)	Temp. Forno Zona 2 (°C)	Vacuômetro cx. Vento (mmca)	Vacuômetro Tubulação (mmca)	Pressão (mmca)
0	27	25	24	27	200	240	12
1	20	26	36	26	240	280	9
2	32	26	84	49	260	300	8
3	48	28	320	50	260	280	8
4	43	28	528	43	260	280	9
5	41	27	786	39	260	280	9
6	38	26	950	36	260	280	9
7	32	28	959	36	260	280	10
8	38	31	995	44	240	280	10
9	50	34	898	125	220	260	11
10	85	40	887	259	200	240	12
11	166	49	870	367	180	220	13
12	272	57	860	445	140	200	14
13	341	62	851	511	140	180	15
14	397	68	843	576	120	160	16
15	450	73	821	627	100	160	16
16	505	76	738	658	100	140	17
17	579	79	634	703	80	140	17
18	637	79	515	748	80	140	17
19	645	79	336	806	60	140	17
20	612	78	217	861	60	140	17
21	575	79	153	922	40	120	18
22	544	78	110	1208	40	120	18
23	523	77	80	1147	40	120	18
24	531	77	63	1081	40	120	18
25	526	74	49	750	40	120	18
26	495	74	41	513	40	120	18
27	456	70	36	373	40	120	19
28	412	70	35	293	40	120	19
29	372	67	32	242	40	120	19
30	338	66	33	211	40	120	19
31	308	64	32	190	40	120	19
32	286	62	34	180	40	120	19
33	264	61	32	194	40	120	19
34	245	61	32	187	40	120	20
35	229	60	32	182	40	120	20
36	213	59	32	169	40	120	20