

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA A IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DA
DESOXIDAÇÃO DO AÇO NO FORNO PANELA

Ronaldo Müller Huppés

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2014

Dedico esta dissertação aos meus pais, Adelar e Jacinta,
e aos meus irmãos, Ricardo e Rodrigo.

AGRADECIMENTOS

À UFRGS como instituição, pela oportunidade e ensino de excelência oferecido.

A todos os professores pelo conhecimento transmitido e pela ajuda sempre que necessária.

Aos meus familiares, em especial meus pais Adelar e Jacinta, pelo amor e carinho, por sempre zelarem e não medirem esforços pela educação de seus filhos, nos ensinando valores, tornando possível a realização desse sonho e de tantos outros.

Aos meus irmãos, engenheiros Rodrigo e Ricardo, pelo incentivo e conselhos para sempre seguir em busca de meus sonhos.

Ao meu professor orientador Wagner Bielefeldt, pela orientação e aconselhamento na execução deste trabalho.

Ao engenheiro Tiago Alliatti Beleza, pela oportunidade de estágio e por possibilitar a realização deste estudo.

Aos colegas de trabalho Gustavo Pelisser, Daniel Rossi, Jakson Mattiello, Guilherme Jantsch, Eduardo Goulart Budo Waltrick e demais colegas da Gerda pelo companheirismo e ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos que conquistei durante o período de graduação, pelo companheirismo nos momentos de dificuldade e pelos bons momentos compartilhados.

Aos colegas da equipe de futebol de campo da UFRGS, Traíras, pelos momentos ímpares representando a universidade.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para que a realização deste trabalho fosse possível.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 OBJETIVOS	2
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Principais Rotas de Produção de Aço	3
3.2 Aciaria Elétrica	4
3.2.1 Pátio de Sucatas.....	5
3.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)	6
3.2.3 Refino Secundário	7
3.2.4 Lingotamento Contínuo	8
3.3 Metalurgia de Panela.....	9
3.3.1 Escórias	10
3.3.2 Equilíbrio Químico Escória x Aço Líquido	12
3.3.3 Desoxidação	13
3.3.4 Rendimento da Adição de Ligas ou Desoxidantes.....	22
3.4 Defeitos em Produtos do Lingotamento Contínuo.....	23
3.4.1 Porosidade Interna – “Blow-Hole”	24
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Materiais	28
4.1.1 Aço Analisado.....	28
4.1.2 Ferroligas	28
4.2 Métodos.....	29
4.2.1 Coleta de dados/amostras	29
4.2.2 Análises Químicas.....	31

4.2.3	Cálculos de Rendimento de Si, %Mn/%Si no aço e %FeO+%MnO na escória	32
4.2.4	Imagens das Escórias	33
4.2.5	Preparação das Amostras de Tarugo	33
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Dados e Amostras Coletadas	34
5.1.1	Evolução da Temperatura no Processo	35
5.1.2	Análise do Oxigênio Ativo.....	36
5.1.3	Temperatura x Oxigênio Ativo	37
5.2	Análise Química do Aço	38
5.2.1	Relação %Mn%Si	40
5.2.2	Rendimento de Si	41
5.3	Análise da Escória.....	43
5.3.1	Composição Química da Escória	43
5.3.2	$O_{\text{Ativo}} \times \%FeO + \%MnO$	45
5.3.3	Análise Visual da Escória	46
5.4	Análise dos Tarugos.....	48
6.0	CONCLUSÕES	51
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Linhas de Produção de Aço – Fonte: Gerdau 2008.....	3
Figura 3.2	Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense – Fonte: Adaptado VILELA(2005).....	7
Figura 3.3	Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC – Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006.....	8
Figura 3.4	Esquema de solidificação de aço no molde - Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006.....	9
Figura 3.5	Coloração característica das escórias: (a) escória com alto teor de FeO, (b) escória com relação FeO + MnO elevada e (c) escória com baixos teores de FeO e MnO. – Fonte: Gerdau 2007.....	11
Figura 3.6	Estabilidade dos óxidos em função da temperatura, conforme Kiessling e Lange.....	12
Figura 3.7	Diagrama binário ferro – oxigênio. – Fonte: Adaptado de LÚCIO, 1981.....	14
Figura 3.8	Relação entre as atividades do oxigênio e de elementos dissolvidos no aço líquido em equilíbrio com seus respectivos óxidos formados a 1600°C. - Fonte: Adaptado de GAYE, 2003.....	15
Figura 3.9	Relação %C x ppm O no banho – pontos da curva – Fonte: Notas de aula Siderurgia II, 2012.....	17
Figura 3.10	Seção de um tarugo apresentando porosidade interna – Fonte: Gerdau 2007.....	18
Figura 3.11	Equilíbrio da desoxidação com Si e Mn, a 1600°C – Fonte: Fruehan, 1985.....	19
Figura 3.12	Teores de Mn e Si do aço em equilíbrio com SiO ₂ sólida e silicatos de Mn líquido a várias temperaturas. Fonte: Turkdogan, 1996.....	20
Figura 3.13	Desoxidação com Mn/Si comparada com Al/Si/Mn para o produto de desoxidação saturado em Al ₂ O ₃ - Fonte: Turkdogan, 1996.....	22
Figura 3.14	Crescimento de dendritas na região líquida-sólida. As áreas vermelhas indicam os sítios preferenciais para a nucleação de bolhas. - Fonte: Serra et al (2011)	26
Figura 3.15	Porosidade interna em corte transversal de tarugo, detalhe dos poros sob lupa estereoscópica 6X.....	27
Figura 4.1	Fluxograma da metodologia do trabalho.....	29

Figura 4.2	Esquema de retirada das amostras ao longo do processo.....	30
Figura 4.3	Amostrador de imersão para retirada das amostras de aço. (a) amostrador usado no distribuidor; (b) amostrador usado no FEA e FP – Fonte: Adaptado de BIELEFELDT (2005).....	30
Figura 4.4	Medidor CELOX Heraeus Electro-Nite – Fonte: Adaptado de BIELEFELDT (2005).....	31
Figura 4.5	Escória aderida à vara instantes após a retirada.....	31
Figura 4.6	Divisão das secções do tarugo para análise de blow-holes.....	33
Figura 5.1	Evolução de temperaturas para a média das corridas analisadas e média histórica ao longo do processo.....	35
Figura 5.2	Resultados de O_{ativo} na chegada e saída do FP das corridas analisadas.....	37
Figura 5.3	Relação O_{ativo} e temperatura do aço de saída do FP das corridas analisadas.....	38
Figura 5.4	Relação entre o O_{ativo} e %Mn/%Si de saída do FP das corridas analisadas.....	39
Figura 5.5	Relação entre o O_{ativo} e rendimento de Si calculados na saída do FP das corridas analisadas.....	42
Figura 5.6	Evolução da composição química média da escória das corridas analisadas nas diferentes etapas do processo.....	44
Figura 5.7	Relação do O_{ativo} com os teores %FeO+%MnO na prova Y.....	45
Figura 5.8	Relação do O_{ativo} com os teores %FeO+%MnO na prova Z.....	46
Figura 5.9	Relação entre O_{Total} e números de blow-holes contados no tarugo.....	49
Figura 5.10	Relação entre O_{Total} e números de blow-holes contados no tarugo.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química típica da escória de forno elétrico a arco e sua origem – Fonte: Gerdau 2008.....	11
Tabela 3.2	Ferroligas mais utilizados para acerto da composição química dos aços. – Fonte: Adaptado SAMPAIO e RIBEIRO (2005).....	16
Tabela 3.3	Resultados dos cálculos de %Mn e %Si a 1600°C.	21
Tabela 3.4	Relação de defeitos de solidificação usualmente avaliados.....	24
Tabela 4.1	Faixa de composição química para o aço SAE 1006 em % do aço.....	27
Tabela 4.2	Composição química média das ligas, % em massa.....	28
Tabela 5.1	Produção de aço e quantidades de ferro ligas utilizadas em cada corrida analisada.....	34
Tabela 5.2	Temperatura do aço das amostras em cada etapa analisada.....	36
Tabela 5.3	Composição Química das amostras de aço nas diferentes provas, % em massa.....	38
Tabela 5.4	Rendimento de silício calculado para as diferentes etapas do processo.....	40
Tabela 5.5	Resultados da análise de composição química das escórias ao longo do processo em cada amostra, % em massa.	43
Tabela 5.6	Evolução da coloração das amostras de escória nas três provas analisadas.....	47
Tabela 5.7	Resultado da análise do O_{Total} e da contagem de porosidades “Blow-Holes” nos tarugos analisados.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\%Mn/\%Si$ – Relação entre os teores de Manganês e Silício dissolvidos no aço

$\%Si_A$ – Teor de Si na amostra do FEA;

$\%Si_B$ – Teor de Si na amostra do Forno Panela;

σ - tensão superficial do aço líquido em contato com a bolha de gás de raio r .

AF – Alto-Forno

Al- Alumínio

Al_2O_3 - Alumina

a_{MnO} – Atividade do Manganês

a_{SiO_2} – Atividade do Silício

C – Carbono

CaF_2 - Fluorita

CaO – Óxido de Cálcio

CaSi – Cálcio Silício

CO – Monóxido de Carbono

Cu – Cobre

DQ – Desenvolvimento da Qualidade

Fe – Ferro

FEA – Forno Elétrico a Arco

FeO – Óxido de Ferro (Wustita)

FeSi – Ferro Silício

FeSiMn – Ferro Silício Manganês

FP – Forno Panela

H – Hidrogênio

K_{Mn} - Constante de Equilíbrio do Mn

K_{Si} – Constante de Equilíbrio do Si

LC – Lingotamento Contínuo

M_{FeSiMn} - Massa de FeSiMn

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de Magnésio

Mn – Manganês

MnO – Óxido de Manganês

N – Nitrogênio

O – Oxigênio

O_{Ativo} – Oxigênio Ativo no Aço

O_{total} – Oxigênio total no aço

P – Fósforo

P₂O₅ – Óxido de Fósforo

pCO - pressão de vapor do Monóxido de Carbono

Pf - pressão ferrostática na localização do poro;

pH₂ - pressão de vapor do Hidrogênio

pN₂ - pressão de vapor do Nitrogênio

Ps - pressão atmosférica sobre a superfície do aço líquido;

PV – Peso vazado

R_{Si} – Rendimento de Si

S – Enxofre

SAE – Society of Automotive Engineers;

Si – Silício

SiC – Carbureto de Silício

SiO₂ - Sílica

Sn – Estanho

T – Temperatura

t – toneladas

ZrO₂ – Óxido de Zircônio

RESUMO

As crescentes exigências do mercado impõe um ritmo acelerado de aperfeiçoamento do processo siderúrgico. Aços destinados à construção mecânica demandam esforços concentrados das empresas em produzir um material de elevada qualidade, com baixo custo agregado.

A porosidade é um dos defeitos mais comuns na produção de tarugos de lingotamento contínuo de jato aberto. É motivo de expressivo sucateamento de barras na laminação, pela presença de trincas no produto acabado.

Baseado nesse conceito, este trabalho busca averiguar alternativas para o controle e identificação de corridas que apresentam oxidação excessiva do aço SAE 1006, produzido numa usina siderúrgica da região sul do Brasil, uma vez que esta é uma das causas principais do sucateamento de tarugos pelo elevado número de porosidades internas “blow-holes” apresentado após a solidificação.

Através dos resultados pode-se afirmar que a obtenção de corridas desoxidadas passa pela implementação de uma correta prática operacional. Temperaturas do aço líquido adequadas em cada etapa do processo, utilização de desoxidantes que garantam o desejado desempenho da escória e rendimento de ligas, são fatores que podem minimizar consideravelmente a formação de porosidades no produto final.

Palavras-chave: Aço. Desoxidação. Rendimento de Liga. Escória. Porosidades

ABSTRACT

The increasing demands of the market requires a fast pace of improvement of the steelmaking process. Steels destined for mechanical engineering require the concerted efforts of companies to produce a material of high quality with low cost unit.

Blow and pin holes are the most common defects in open cast billet production. It's a cause of significant rolling mill scrap due to the incidence of cracks on end product.

Based on this concept, this paper seeks to examine alternatives for the control and identify heats that have excessive oxidation of SAE 1006 steel, produced in a steel mill in southern Brazil, since this is a major cause of the high scrap billets number of internal porosity "blow-holes" formed after solidification.

From the results it can be stated that obtaining races with low levels of dissolved oxygen in the steel involves the implementation of correct operational practice. Temperatures suitable liquid steel at every stage of the process, use of oxidants ensuring the desired performance of the slag and yield alloys are factors that greatly minimize the formation of porosity in the final product.

Keywords: Steel. Deoxidation. Yield Alloys. Slag. Blow-Holes.

1.0 INTRODUÇÃO

As crescentes exigências do mercado impõem um ritmo acelerado de aperfeiçoamento do processo siderúrgico. Aços destinados à construção mecânica demandam esforços concentrados das empresas em produzir um material de elevada qualidade, com baixo custo agregado.

A presença de defeitos internos nos produtos semi-acabados e acabados pode impossibilitar os processos de conformação mecânica posteriores, ou ainda afetar severamente as propriedades mecânicas do produto final.

A formação de porosidades “blow-holes” no material lingotado continuamente é um dos principais defeitos de fabricação que levam ao sucateamento de tarugos. Está diretamente ligada à presença de quantidade significativa dos elementos H, N, O e C, formadores de gases e, que durante a solidificação, devido à reduzida solubilidade dos mesmos no sólido, haja um natural enriquecimento no líquido remanescente, favorecendo a formação de poros e conseqüentemente, de defeitos nos tarugos.

Um bom controle sobre a formação de porosidades passa pela implementação de uma correta prática operacional que permita obtenção de corridas desoxidadas. Temperaturas do aço líquido adequadas em cada etapa do processo, utilização de desoxidantes corretos, que garantam o desejado desempenho da escória e rendimento de ligas, são fatores que podem assegurar um produto com a qualidade desejada.

2.0 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é averiguar alternativas para o controle e identificação de corridas que apresentam oxidação excessiva do aço, uma vez que esta é uma das causas principais do sucateamento de tarugos pelo elevado número de porosidades apresentado após a solidificação.

Para isso, buscou-se:

- Analisar o comportamento do nível de oxigênio ativo frente à temperatura do aço, ao rendimento de Si calculado e as relações do %Mn/%Si no aço.
- Avaliar o nível de desoxidação do banho através da comparação com os teores de FeO e MnO presentes na escória, e como estes influenciam na coloração da escória.
- Realizar comparação entre os resultados da análise de O_{total} e a contagem de porosidades “Blow-Holes” no tarugo, assim como a comparação entre o número de porosidades com o oxigênio ativo na saída do FP e rendimento de Si calculado.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão serão apresentados os aspectos básicos que motivam o estudo sobre a formação de porosidades em tarugos. Primeiramente, será mostrado um resumo sobre o processo de produção. Em seguida, serão tratados assuntos referentes à metalurgia de panela como: a escória e seu equilíbrio químico com o aço, processo de desoxidação, controle da temperatura e como estes influenciam na solubilidade do oxigênio. Por fim, será exposto o mecanismo de formação de porosidades em tarugos, assim como os alguns dos fatores que favorecem no desenvolvimento deste defeito no produto final.

3.1 Principais Rotas de Produção de Aço

Existem, atualmente, duas rotas principais para a produção de aço diferenciadas pela matéria-prima utilizada, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

- Partindo do minério de ferro;
- Partindo da sucata ferrosa.

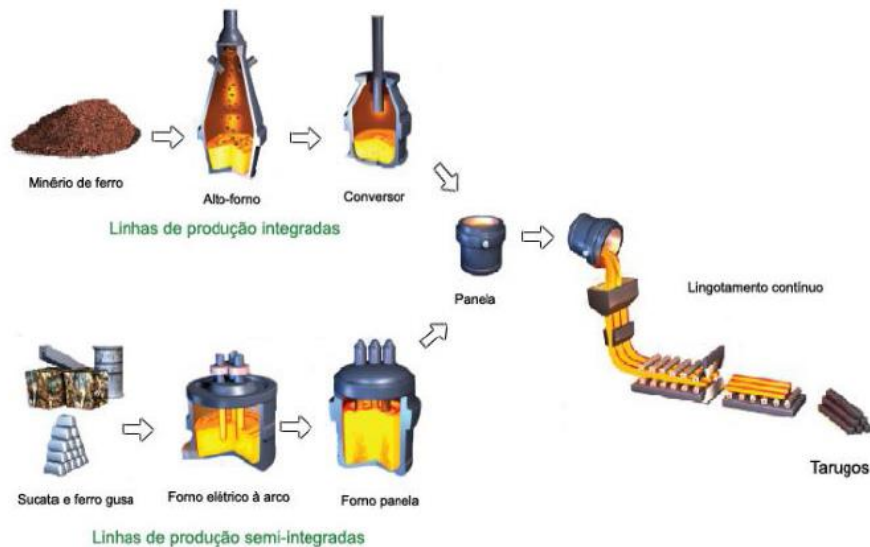


Figura 3.1 Linhas de Produção de Aço – Fonte: Gerdau 2008.

Na figura 3.1, fluxo superior, está demonstrada a produção de aço em uma usina integrada, que tem como base o minério de ferro e como principais reatores o Alto-Forno

(AF) e o conversor a oxigênio. No AF o minério de ferro (na forma de minério bitolado, sinter e/ou pelotas), é carregado juntamente com o coque (ou carvão vegetal) e passa pelas etapas de redução e fusão, dando origem ao ferro-gusa, que é uma liga a base de ferro com teores de carbono entre 4 e 5%. Após ser vazado do AF o ferro-gusa é levado ao conversor da aciaria onde passa pela etapa de refino oxidante, produzindo o aço.

No fluxo inferior está ilustrada a produção de aço em uma usina semi-integrada, que tem como matéria-prima a sucata e o ferro-gusa sólido e como reatores o forno elétrico a arco (FEA) e o forno panela (FP), os quais serão estudados mais detalhadamente nos itens a seguir.

Em ambas as rotas, após o refino, o aço é conduzido ao lingotamento onde é solidificado dando origem a um produto semi-acabado como tarugos, lingotes entre outros os quais serão beneficiados, podendo dar origem a uma vasta gama de produtos, laminados, trefilados e forjados.

3.2 Aciaria Elétrica

Uma aciaria elétrica é o local onde se produz aços a partir da fusão de sucata metálica, ferro-gusa sólido ou líquido, ferro esponja em um forno denominado forno elétrico a arco.

O processo de produção em aciarias elétricas é dividido em três etapas:

Refino primário (oxidante): nesta etapa é realizada a fusão da carga metálica, ajuste de elementos como o C, Si, P, Al, Mn e a temperatura de vazamento. Além disso, é realizada a adição de elementos de liga (ferro ligas) no momento do vazamento do aço.

Refino Secundário: nesta etapa é realizado o acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento.

Lingotamento do aço: processo pelo qual o aço líquido é solidificado em um produto semi-acabado.

3.2.1 Pátio de Sucatas

A produção do aço em uma aciaria elétrica inicia no pátio de sucatas, local onde não somente é realizado o recebimento da sucata ferrosa e ferro-gusa, mas também sua classificação, disposição, separação e beneficiamento, dependendo da necessidade.

A sucata pode ser classificada em quatro categorias principais:

- Interna: gerada dentro das instalações industriais das usinas siderúrgicas ou de fundições. Constituída de cascões de panela, lingotes, placas ou tarugos, recortes da linha de acabamento, etc.
- Externa: gerada fora das instalações industriais das usinas siderúrgicas ou de fundições.
- Industrial: proveniente de qualquer processamento industrial, como restos de estamparia, retalhos de chapa, etc.
- Obsolescência: resultante de todos os materiais considerados obsoletos e irre recuperáveis para o uso a que se destinava originalmente (Ex.: peças, veículos, navios, etc).

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

Para otimização da fusão no forno, a sucata pode passar por algumas etapas de beneficiamento, utilizando equipamentos como prensa tesoura, shredder, prensa pacote, oxicorte, entre outros.

Além da sucata, utiliza-se no forno ferro-gusa, conforme a disponibilidade da usina e custo das matérias primas.

É de vital importância que a preocupação com a qualidade do produto final comece pelo início do processo, pois assim é possível evitar uma série de problemas e reduzir custos na fabricação do aço.

3.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

Essa etapa é responsável pela fusão da sucata e refino primário do aço. A energia fornecida pelo arco elétrico e pelas reações químicas eleva a temperatura do sistema até a fusão completa da carga adicionada ao forno.

Os estágios de operação do forno elétrico compreendem o carregamento, fusão, refino e vazamento do aço.

O estágio de carregamento está ligado à formulação da carga fria, a qual compreende uma mistura de sucata e insumos adicionados em quantidades específicas, necessários à fabricação de determinado aço. Essa etapa pode ser dividida em sequências de carregamento que preencham corretamente a capacidade do forno.

Essas sequências de carregamento são alternadas com etapas de fusão do material adicionado, de forma a reduzir o volume ocupado no forno, e permitir o aproveitamento de toda sua capacidade de produção. Após o último carregamento, vaza-se a escória formada, e dá-se início ao processo de refino oxidante.

Nessa etapa acontecem os processos de descarburização e desfosforação, respectivamente redução do teor de carbono e fósforo no aço. Durante esse processo, trabalha-se com a formação de escória espumante pela injeção de oxigênio com materiais carbonosos na escória (por exemplo, carvão ou coque de petróleo). A escória espumante melhora consideravelmente a eficiência energética do forno, podendo aumentar a eficiência da produção em mais de 20%. A espuma ainda protege o refratário do forno do desgaste excessivo, diminui a perda de calor para as paredes do forno, além de reduzir consideravelmente o ruído provocado pelo arco elétrico.

Ao término desta operação ocorre nova retirada da escória antes de proceder-se o vazamento do aço líquido para a panela, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.2.

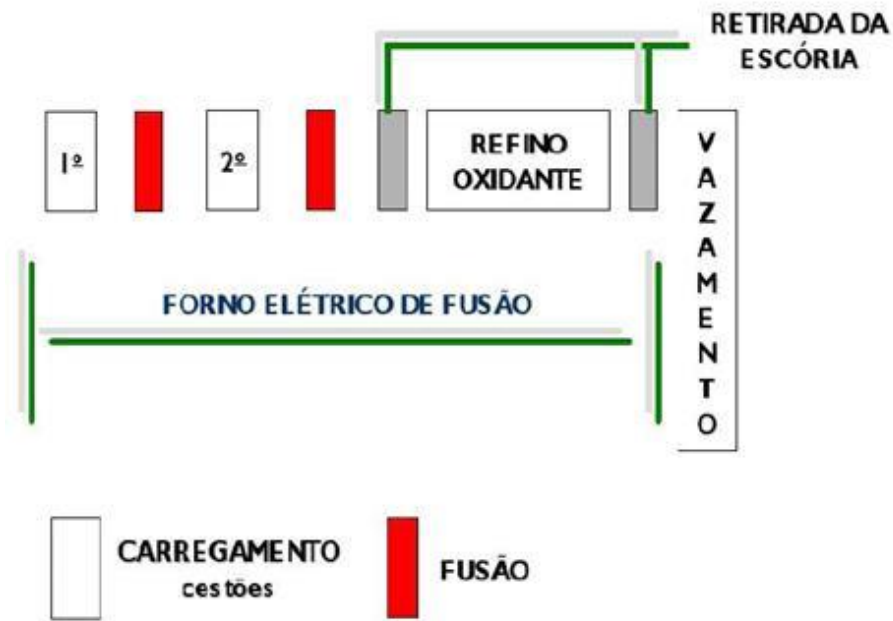


Figura 3.2 Fluxo do processo de carregamento e operação do forno elétrico da Gerdau Riograndense – Fonte: Adaptado VILELA(2005).

3.2.3 Refino Secundário

Chama-se refino secundário aquele que é realizado fora do equipamento de fabricação do aço bruto (Forno Elétrico a Arco ou Conversor a Oxigênio) (MOURÃO 2007).

Pela dificuldade de retirar certas impurezas no equipamento de fabricação do aço bruto, atualmente grande parte das usinas siderúrgicas utiliza a técnica de metalurgia de panela, já que as reações metalúrgicas ocorrem na própria panela onde o aço é vazado.

Os principais processos de refino realizados no Forno-Panela são:

- Dessulfuração;
- Desoxidação;
- Desgaseificação (retirada de hidrogênio e nitrogênio);

Além disso, no FP deve ser realizado o ajuste final da composição química e temperatura do aço e alteração da morfologia de inclusões.

Destaca-se como principal função do forno-panela a redução do teor de oxigênio no banho, realizado através da remoção de óxidos. Os óxidos são formados com adição de elementos desoxidantes que possuem alta afinidade por oxigênio, como alumínio, silício, manganês, que darão origem a escória do refino redutor.

Após passar pela etapa de refino secundário, o aço está pronto para ser encaminhado ao lingotamento contínuo, onde será solidificado.

3.2.4 Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo (LC) dos aços é a última etapa em aciaria onde se trabalha com o metal ainda no estado líquido. Tem como missão solidificar o aço em uma forma desejável de tal maneira que possa ser utilizada nas etapas seguintes da cadeia produtiva (MOURÃO 2007).

Depois de completado o trabalho de refino secundário, a panela, que é dotada de um mecanismo para vazamento (mecanismo de válvula gaveta), é transportada ao LC. Na máquina de lingotamento a panela é posicionada sobre o distribuidor. Esse equipamento é um recipiente formado por uma carcaça metálica revestida por refratários e tem como funções principais armazenar o aço líquido entre a panela e os moldes e alimentar os veios como está demonstrado na Figura 3.3.

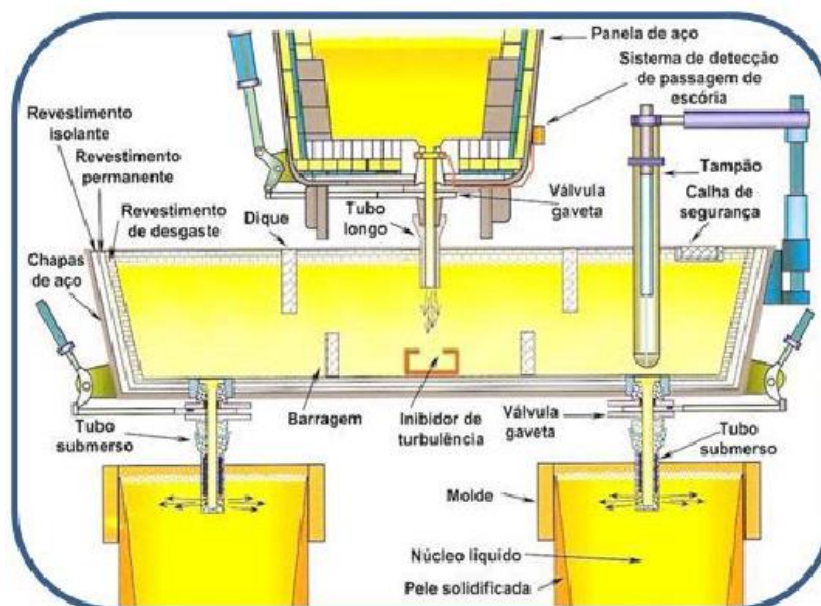


Figura 3.3 Componentes que podem ser utilizados em um distribuidor de LC – Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006.

O aço do distribuidor é vazado pelos veios para o molde (Figura 3.4), que é considerado a parte mais importante do lingotamento contínuo. Nele, ocorre o início da solidificação do aço líquido e é no molde que se definirá o perfil do produto (MOURÃO 2007).

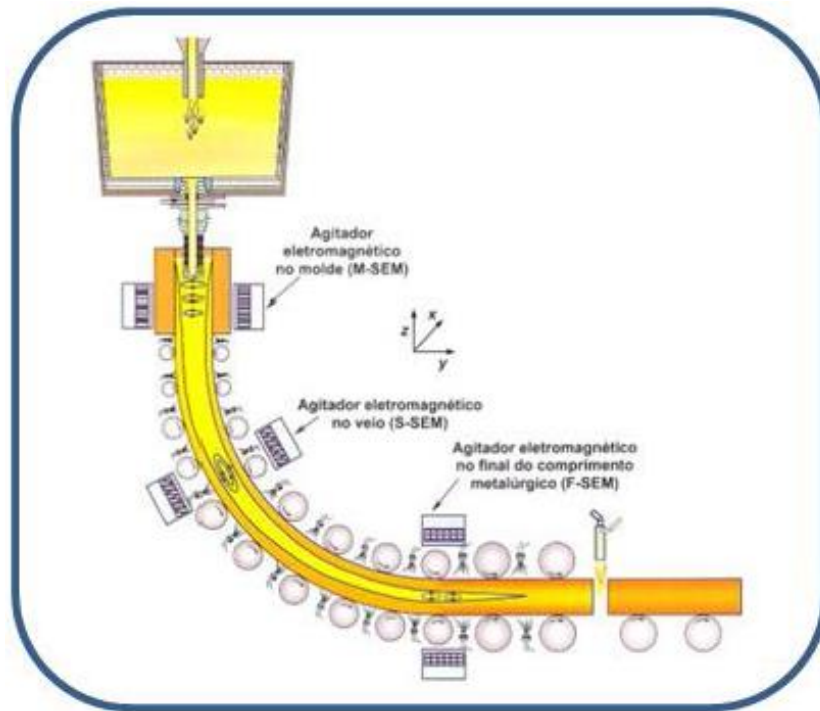


Figura 3.4 Esquema de solidificação de aço no molde - Fonte: Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ABM 2006.

Como pode ser visualizado na Figura 3.5, abaixo do molde as máquinas de lingotamento possuem um sistema de rolos os quais têm por função suportar o peso do tarugo e conduzi-los para fora da máquina, dando lugar ao novo aço que entra no molde.

Após passar pelos rolos, o tarugo é cortado na dimensão especificada e está pronto para ser encaminhado ao beneficiamento interno ou ao cliente.

3.3 Metalurgia de Panela

Segundo Finardi e Hansen (1981), o refino secundário pode ser entendido como o conjunto de processos “externos” aos Fornos Primários BOF e FEA, que se expandiu a partir da década de 70 na fabricação dos aços, visando:

- Aumento da produtividade.

- Redução de custos.
- Melhoria da qualidade na fabricação dos aços.

Dentre as várias funções desempenhadas pelo refino secundário destaca-se a de “buffer” entre o refino primário e o lingotamento contínuo. Objetiva-se um grande número de corridas lingotadas numa sequência bem como velocidade estável de lingotamento. Para tanto é imprescindível que a panela com aço chegue à máquina de lingotamento contínuo no horário e dentro das faixas pré-determinadas de temperatura.

3.3.1 Escórias

Escória é um produto não metálico, que essencialmente consiste em silicatos de cálcio e ferro, combinados com óxidos de Fe, Al, Mn, Ca e Mg fundidos, que aparece como co-produto do aço resultante das atividades realizadas nas usinas integradas de aço ou nas usinas com forno elétrico a arco.

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

Tipicamente a composição química da escória dos processos de aciaria elétrica, para aços longos apresenta principalmente teores de SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , MnO , P_2O_5 e CaF_2 , esses variáveis de acordo com a etapa do processo.

Na Tabela 3.1, pode ser observada a composição química típica de uma escória empregada em fornos elétricos a arco para a fabricação de aços baixo/médio ao carbono, bem como a sua origem.

Tabela 3.1 Composição química típica da escória de forno elétrico a arco e sua origem – Fonte: Gerdau 2008.

COMPOSTO	(%)	ORIGEM
CaO	35-50	Adicionado como cales calcítica ou dolomítica
SiO ₂	10-25	Oxidação do Si no aço ou como terra
FeO	20-45	Oxidação do Fe no aço ou como carepa
MgO	5-15	Adicionado como cal dolomítica
Al ₂ O ₃	4-12	Adicionado
MnO	4-10	Oxidação do Mn no aço
P ₂ O ₅	<1	Oxidação do P no aço
CaF ₂	<1	Adicionado

Na próxima etapa do processo, no forno-panela, a composição química mais desejável da escória, tem teores reduzidos de FeO e MnO, assim como valores mais elevados de CaO e SiO₂.

Operacionalmente uma ferramenta utilizada, mesmo que sem muita precisão para o controle do processo, é a visualização da cor da escória. Escórias com coloração preta, indicam elevados teores de FeO, Figura 3.5(a). Já a coloração marrom, indica elevados valores da relação FeO + MnO na escória, Figura 3.5(b). Em contrapartida, escórias com coloração clara, possuem baixos teores de FeO e MnO, Figura 3.5(c) (Gerdau 2008).

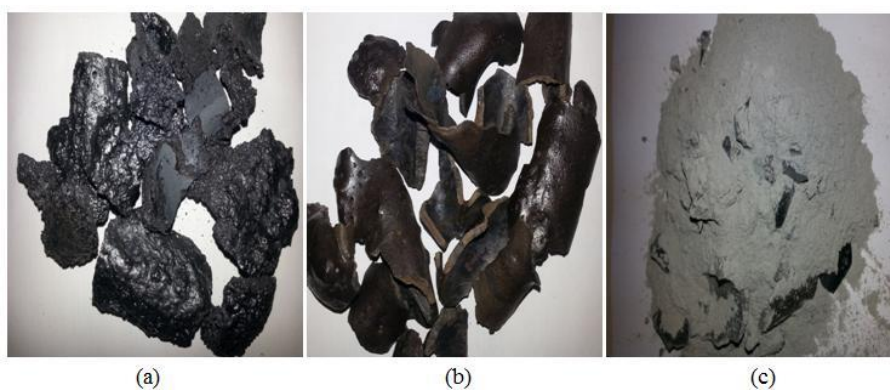
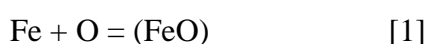


Figura 3.5 Coloração característica das escórias: (a) escória com alto teor de FeO, (b) escória com relação FeO + MnO elevada e (c) escória com baixos teores de FeO e MnO. – Fonte: Gerdau 2007.

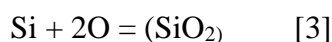
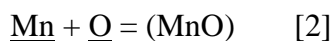
3.3.2 Equilíbrio Químico Escória x Aço Líquido

Para o completo entendimento dos processos de refino secundário do aço, é importante que seja entendido que os elementos químicos presentes no aço líquido estão em permanente equilíbrio com os compostos presentes na escória, ou nas inclusões presentes no aço (MOURÃO 2007).

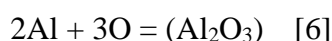
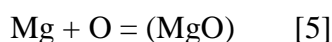
A principal reação [1] de equilíbrio químico entre aço e escória é a que exprime a relação entre o oxigênio dissolvido no aço líquido (\underline{O}), o ferro presente no aço líquido (\underline{Fe}) e o óxido de ferro (FeO) presente na escória ou nas inclusões dentro do aço:



O equilíbrio pode ser deslocado para a esquerda, isto é, para a dissolução de oxigênio no aço, se houver grande quantidade de FeO na escória. Em contrapartida, a ausência de FeO na escória desloca o equilíbrio para a direita, o que na prática significa que a escória passa a absorver o oxigênio dissolvido no aço na forma de FeO formado na escória. Esta equação de equilíbrio explica a necessidade de se minimizar a quantidade dos chamados óxidos não estáveis na escória, pois os seguintes equilíbrios podem ser entendidos de forma análoga pelas reações [2] e [3]:



No caso dos chamados óxidos estáveis, pela própria natureza de seus elementos constituintes, o equilíbrio está sempre deslocado para a formação do óxido (para a direita):



Entende-se das equações acima que, em se tendo um dos elementos formadores de óxidos estáveis, e oxigênio dissolvido no aço líquido, à formação do óxido é preferencial, removendo-se oxigênio dissolvido no aço.

3.3.3 Desoxidação

A reação de desoxidação é tanto mais eficiente quanto maior for a afinidade do desoxidante pelo oxigênio (FINARDI 1984). A formação dos óxidos está relacionada com a estabilidade do composto formado em função da temperatura. Esta relação está representada na Figura 3.6, onde se pode observar que na faixa de temperatura de trabalho, entre 1550 e 1650°C, os óxidos mais estáveis são CaO, Al₂O₃, ZrO₂ e MgO.

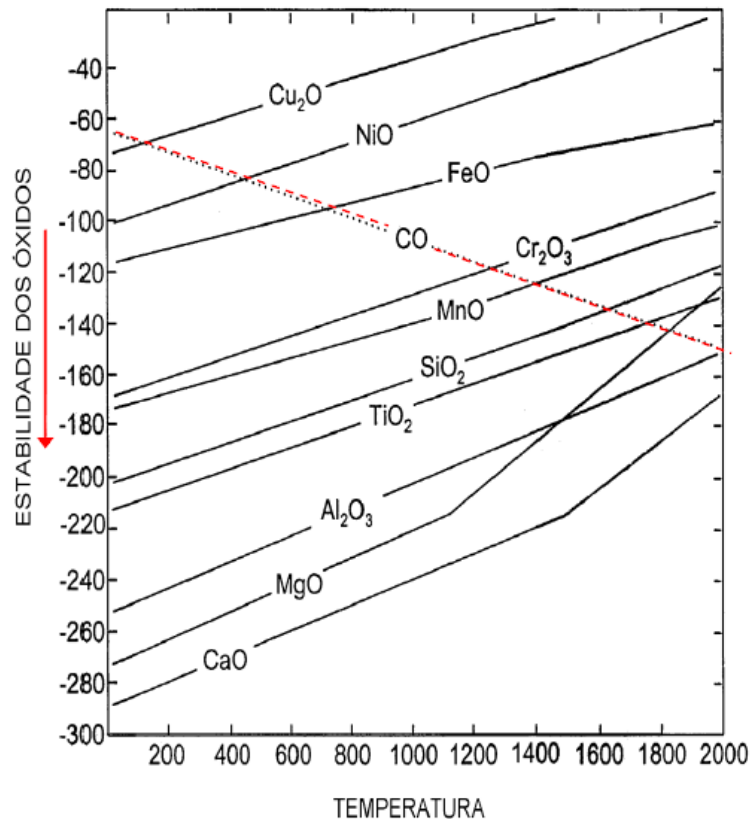


Figura 3.6 Estabilidade dos óxidos em função da temperatura, conforme Kiessling e Lange.

O oxigênio pode estar em distintas formas no processo. O valor de oxigênio total é obtido da análise química que inclui o oxigênio associado a inclusões e o oxigênio solúvel.

O oxigênio dissolvido, ou “livre” ou “solúvel”, depende do limite de solubilidade do mesmo no ferro líquido (que é função da temperatura). Isso pode ser visualizado na Figura 3.7, onde é mostrada a parte de interesse no diagrama de fase Fe-O.

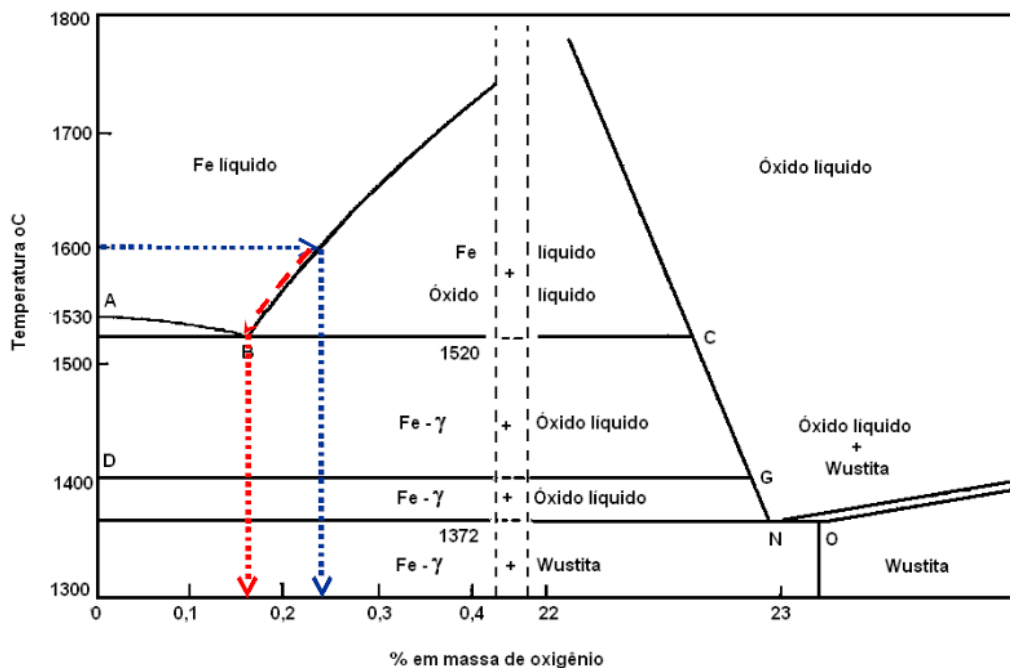


Figura 3.7 Diagrama binário ferro – oxigênio. – Fonte: Adaptado de LÚCIO, 1981.

Na temperatura de 1600°C a solubilidade máxima de oxigênio em ferro é cerca de 2300ppm. Já na temperatura de solidificação do ferro puro, 1534°C a solubilidade máxima de oxigênio em ferro é cerca de 1700ppm.

Para temperatura constante, em valores de oxigênio maiores que o de saturação, é precipitado o FeO (óxido líquido) em ferro líquido. Entre 1600°C e 1530°C, cerca de 600ppm de oxigênio formam FeO (wustita).

Abaixo de 1530°C o oxigênio restante (solúvel), cerca de 1700ppm, precipitará nos contornos de grão do ferro solidificado, na forma de inclusões de FeO.

A precipitação de FeO é evitada mediante a redução do teor de oxigênio, antes do início da solidificação, sendo também denominada desoxidação prévia do metal.

A eliminação de oxigênio ocorre, inicialmente, quando o elemento desoxidante é adicionado ao aço. A inclusão formada é denominada de produto de desoxidação primária. A eliminação de oxigênio pode ocorrer, também, pela queda de temperatura, quando cai a solubilidade mútua do oxigênio e elemento desoxidante. Este processo é denominado desoxidação secundária. Finalmente, pode ocorrer a precipitação de inclusões pela grande variação de solubilidade no momento da solidificação. Este último processo é chamado de desoxidação terciária, segundo Finardi (1984).

A Figura 3.8 apresenta a relação entre as atividades do oxigênio e de outros elementos dissolvidos no aço em equilíbrio com seus respectivos óxidos formados a 1600°C. Observa-se que um aumento na atividade dos elementos desoxidantes reduz a atividade do oxigênio, o que significa dizer que os óxidos destes elementos desoxidantes são mais estáveis nessa temperatura do que os óxidos de ferro.

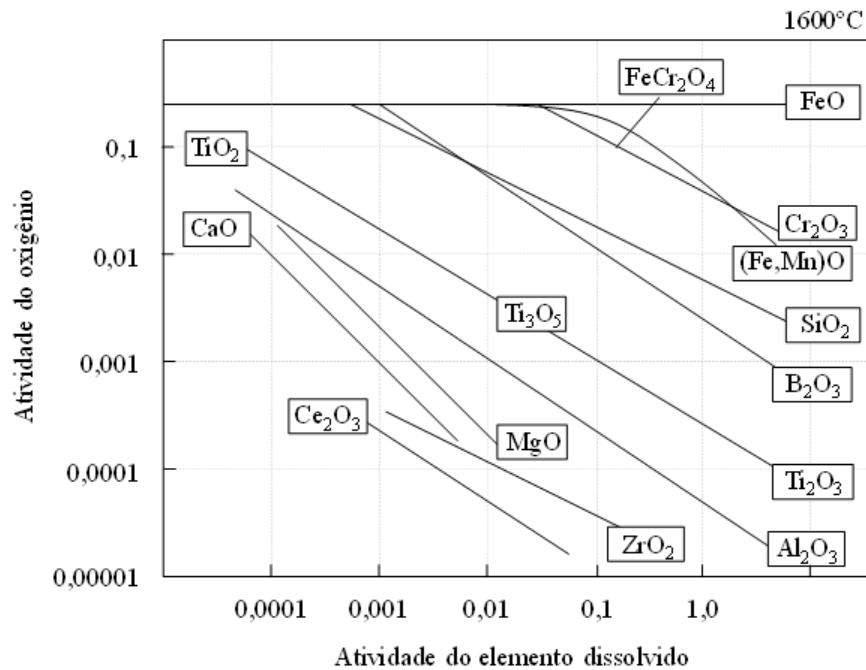


Figura 3.8 Relação entre as atividades do oxigênio e de elementos dissolvidos no aço líquido em equilíbrio com seus respectivos óxidos formados a 1600°C. - Fonte: Adaptado de GAYE, 2003.

A introdução do desoxidante não implica, obrigatoriamente, a diminuição do teor de oxigênio do aço. Este último efeito é somente obtido quando as inclusões formadas forem removidas do seio do metal líquido.

As principais ferroligas utilizadas nas operações de acerto de composição química podem ser observadas na Tabela 3.2.

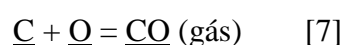
Tabela 3.2 Ferroligas mais utilizados para acerto da composição química dos aços. –
Fonte: Adaptado SAMPAIO e RIBEIRO (2005).

Liga	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	Outros
FeMn AC	6,5	73,0	0,6	0,22	0,008	1,5	0,8	
FeMn BC	1,3	80,7	0,6	0,03	0,400			
FeCr AC	7,4		3,3	0,03	0,007	55,6		
FeCr BC	0,1		0,5	0,02	0,002	54,3		
FeSi 75	0,1		72,2	0,03	0,002			Al = 0,13
FeSiMn	1,7	63,0	15,4	0,12	0,010			
FeP			0,2	20,40	0,200			
FeB								B = 14,7
FeV	0,1		0,8	0,01	0,026			V = 53,0
FeW								W = 32,5
S					96,000			
Al								Al = 98,6
CaSi	0,2		51,2					Ca = 31,1
SiC	30,0		64,0					
Coque	98,0				0,810			
Grafite	97,5							
FeNb	0,1		1,6	0,03				Nb = 65,2
MoO3			1,1	0,05				Mo = 62,0
FeTi			1,5	0,03	0,025			Ti = 37,5
Cu								Cu = 99,9
Mn		99,0			0,002			
Si	0,1		98,0					
FeS					30,000			
FeMo			0,7	0,05	0,015			Mo = 59,0
FeNi	0,1						18,0 a 50,0	
Ni					0,005		99,5	

Industrialmente, para fabricação de aços longos, podemos destacar a utilização de coque, FeSiMn, FeSi, SiC, Al e CaSi. Importante salientar que CaSi, não é adicionado durante o vazamento do aço do forno para a panela, e sim, pela injeção de envoltório de aço que contém a ferro-liga pulverizada.

Podemos destacar dois tipos de desoxidação (MOURÃO 2007):

Desoxidação com produtos gasosos: a desoxidação com produtos gasosos é descrita pela reação [7].



Neste caso, o equilíbrio químico não se dá entre o aço e a escória, mas entre o aço e a atmosfera, com o equilíbrio deslocando para a direita (formação de CO, com a

desoxidação do aço), com o aumento de carbono dissolvido no aço ou com a redução do teor de CO na atmosfera.

A Figura 3.9, mostra a curva de equilíbrio da solubilidade entre CxO com $PCO = 1$ e $T = 1600^{\circ}C$.

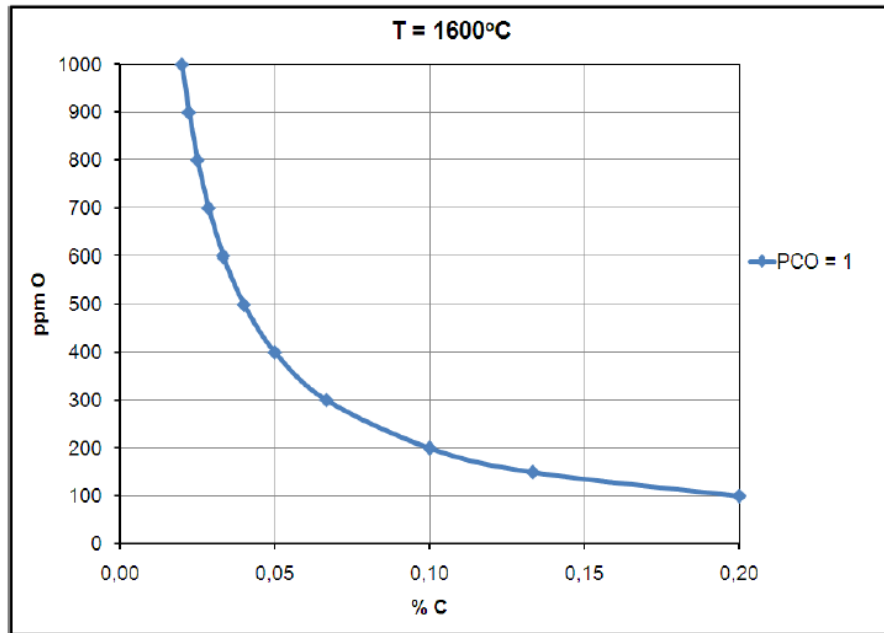


Figura 3.9 Relação %C x ppm O no banho – pontos da curva – Fonte: Notas de aula Siderurgia II, 2012.

Pode-se perceber que quanto menor o teor de carbono, fato comum na fabricação de aços longos, mais altos serão os equilíbrios com o oxigênio solúvel.

Segundo Serra et al (2011) , se o oxigênio estiver acima do limite de solubilidade há evolução do gás CO. Este fato pode explicar a formação de porosidades (blow e pinholes), Figura 3.10, na solidificação de tarugos de aços pouco desoxidados e de lingotes de aços efervescentes.



Figura 3.10 Seção de um tarugo apresentando porosidade interna – Fonte: Gerdau 2007.

Dáí a necessidade do uso de outros desoxidantes mais fortes, ou seja, onde o equilíbrio termodinâmico resulta em níveis de oxigênio solúvel mais baixos.

Desoxidação com produto sólido ou líquido: as principais reações químicas que regem a desoxidação com produtos líquidos e sólidos, [2], [3], [4], [5] e [6], foram citadas como exemplos de equilíbrio químico entre aço líquido e a escória.

O manganês é um desoxidante que proporciona valores altos de oxigênio no aço, mesmo quando usado em elevadas concentrações, por isso chamado de desoxidante fraco. São utilizados em alguns casos especiais como desoxidante e formados de sulfetos, como são os dos aços efervescentes e de usinagem fácil (free-cutting) (GERDAU 2007).

Embora a desoxidação com silício seja mais efetiva, um dos produtos da reação resulta na formação de inclusões sólidas (Cristobalita $\text{SiO}_2(\text{S}_6)$) (TURKDOGAN 1996). Sílica como inclusão é muito dura (1600Hv), inadequada nos processos de transformação, como usinagem e trefilação, podendo causar desgaste acentuado das ferramentas de usinagem ou quebra de arame durante a trefilação (SCAL 2008).

O uso combinado de Si e Mn na desoxidação é mais eficiente do que o uso isolado de Si ou Mn. A razão para a maior eficiência é a formação de um composto chamado

silicato de manganês, que também é líquido nas temperaturas usuais do aço líquido, não formando inclusões nem sendo absorvido pela escória. Esta contínua remoção do silicato de manganês, por dissolução no aço líquido, leva o equilíbrio constantemente para a direita, aumentando muito a eficiência da desoxidação (MOURÃO 2007).

A Figura 3.11 mostra a relação entre %Si dissolvido versus %O dissolvido no banho.

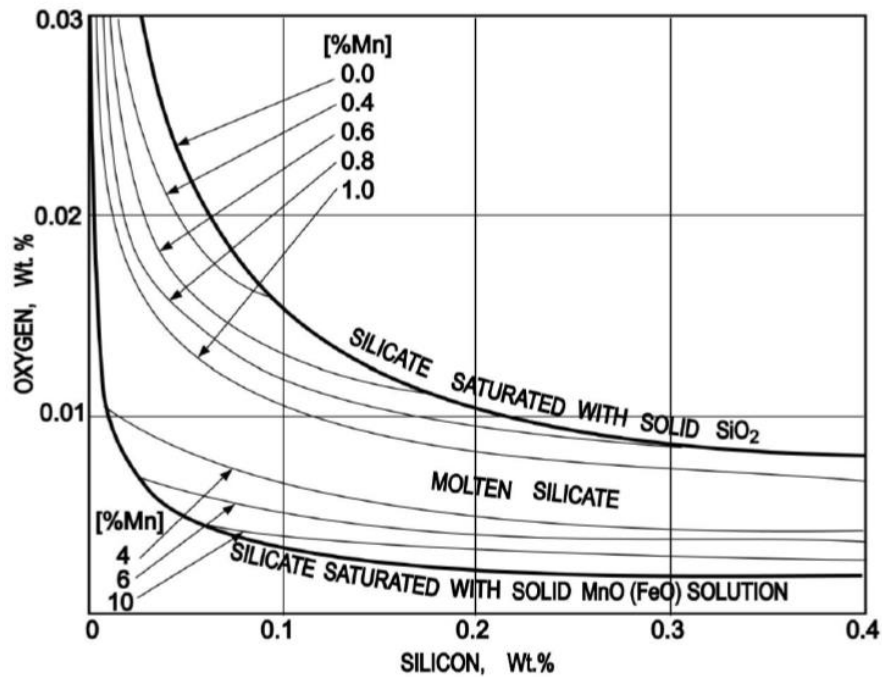


Figura 3.11 Equilíbrio da desoxidação com Si e Mn, a 1600°C – Fonte: Fruehan, 1985.

Podemos notar que os valores de oxigênio dissolvidos são menores quando se adicionam Mn e Si juntos. Aumentado-se o teor de Mn de 0,40% para 0,80%, e mantendo-se Si em 0,08%, há desoxidação suplementar de aproximadamente 40ppm de oxigênio.

A Figura 3.12 mostra os teores de Si e Mn em equilíbrio com SiO₂ e o silicato de manganês líquido para várias temperaturas.

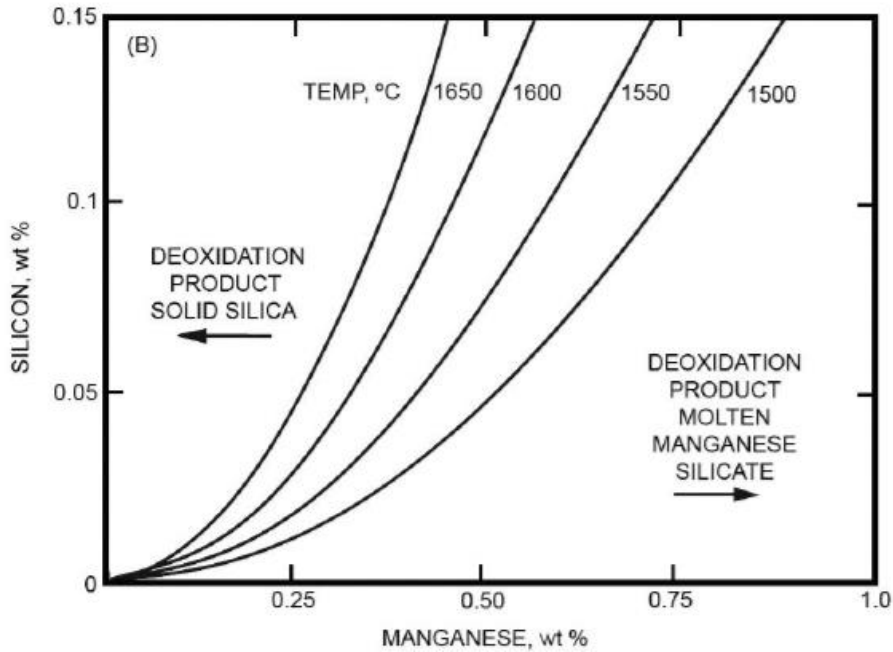


Figura 3.12 Teores de Mn e Si do aço em equilíbrio com SiO₂ sólida e silicatos de Mn líquido a várias temperaturas. Fonte: Turkdogan, 1996.

Para uma dada temperatura, na área acima da curva, o Mn não toma parte na reação de desoxidação, formando SiO₂ sólida. Nas regiões abaixo da curva, o produto é o silicato de manganês líquido. Pode-se observar que as curvas são funções quadráticas representadas por Mn²/Si.

Através das curvas acima, fixando-se a a_{SiO₂} = 1, utilizando as equações das constantes de equilíbrio, K_{Si} [1] e K_{Mn} [2] (GHOSH 2001), para T e %O conhecidos, podemos calcular as %Si e %Mn.

$$K_{Si} = \frac{[\%Si] \times [\%O]^2}{a_{SiO_2}}; \log K = \frac{-30110}{T} + 11,4 \quad [1]$$

$$K_{Mn} = \frac{[\%Mn] \times [\%O]}{a_{MnO}}; \log K = \frac{-11070}{T} + 4,536 \quad [2]$$

Para T=1600°C, K_{Mn} = 0,041 e K_{Si} = 2,11x10⁻⁵.

A Tabela 3.3 mostra uma relação entre %Mn/%Si para diferentes teores de oxigênio dissolvido.

Tabela 3.3 Resultados dos cálculos de %Mn e %Si a 1600°C.

%Mn	%Si	%Mn/%Si	O (ppm)
0,9654	0,4305	2,24	70
0,8447	0,3296	2,56	80
0,7509	0,2604	2,88	90
0,7426	0,2547	2,92	91
0,7346	0,2492	2,95	92
0,7267	0,2439	2,98	93
0,7189	0,2387	3,01	94
0,7114	0,2337	3,04	95
0,7040	0,2289	3,08	96
0,6967	0,2242	3,11	97
0,6896	0,2197	3,14	98
0,6826	0,2152	3,17	99
0,6758	0,2110	3,20	100
0,5632	0,1465	3,84	120
0,5406	0,1350	4,00	125

Podemos perceber que quanto maior a relação %Mn/%Si, maior a quantidade de oxigênio dissolvido no banho.

Quando buscamos valores de oxigênio dissolvido ainda mais baixos, utiliza-se além de Mn e Si, o alumínio. A Figura 3.13 mostra a redução expressiva que é atingida com a utilização de alumínio.

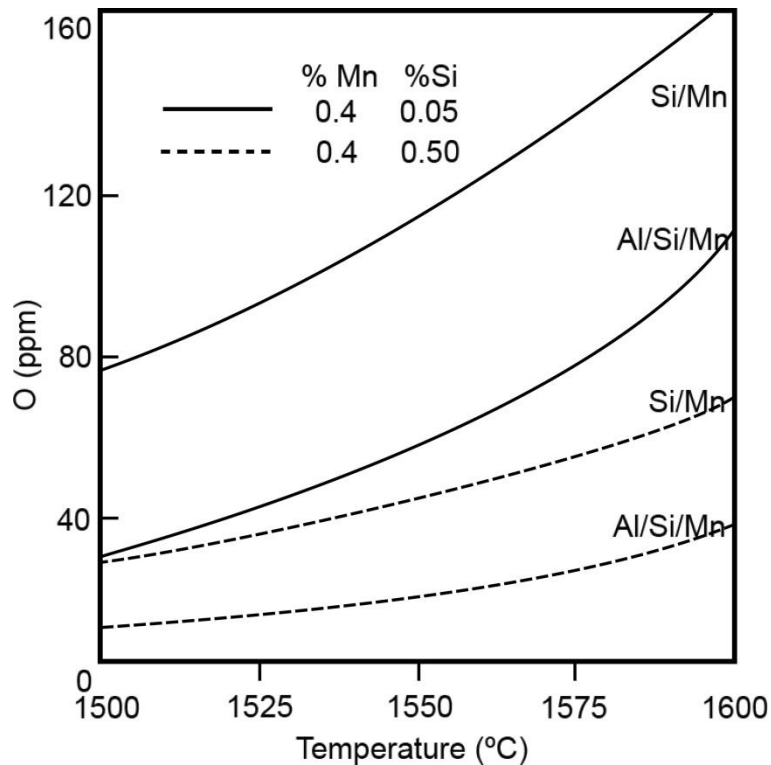


Figura 3.13 Desoxidação com Mn/Si comparada com Al/Si/Mn para o produto de desoxidação saturado em Al_2O_3 - Fonte: Turkdogan, 1996.

Segundo Scal (2008), deve-se haver o controle de alumínio solúvel para não estar acima de 7 ppm, para evitar predominância de Al_2O_3 e a possibilidade de ocorrência de obstrução das válvulas (*clogging*) no lingotamento contínuo.

A utilização de CaSi durante o refino secundário, além de contribuir na desoxidação, atua como um excelente modificador de inclusões, principalmente naqueles aços em que Al_2O_3 é produto da desoxidação, transformando inclusões sólidas em produtos líquidos, chamados de cálcio-aluminatos (BIELEFELDT 2005).

3.3.4 Rendimento da Adição de Ligas ou Desoxidantes

Um elemento de liga ao ser adicionado ao aço pode permanecer como liga ou formar um óxido. O óxido é gerado pela reação com o oxigênio dissolvido do aço, com o $FeO + MnO$ da escória ou até por reoxidação com o ar (FALCONI 1980).

O rendimento de liga pode ser definido pela equação [3]:

$$R(\%) = \frac{\text{Elemento no aço}}{\text{Elemento Adicionado}} \quad [3]$$

Para que o rendimento seja próximo de 100% é necessário que se tenha desoxidado o aço até um valor tal que a liga adicionada não tenha “capacidade” de rebaixar o teor de oxigênio residual; que se tenha previamente reduzido totalmente a escória e, finalmente, se evite a reoxidação com o ar.

A desoxidação intensa e a redução da escória nem sempre são tarefas tão fáceis. O teor de oxigênio na chegada do forno panela varia muito decorrente das variações no processo de fusão no FEA e da quantidade e composição da escória que passa do forno para a panela. A medição por um sensor de O é sempre um “aliado” para atingir o nível de desoxidação necessário.

Nos aços desoxidados ao Si-Mn, o rendimento do Si tem uma importância fundamental para interpretar o “nível” de oxidação da corrida.

Rendimentos de Si fora dos valores esperados devem soar como um alarme para a operação e uma mudança de procedimento operacional do FP deve ser conduzida a fim de evitar os seguintes problemas no LC (SCAL 2008):

- $R_{Si} \lll Normal$ - Porosidades nos tarugos;
- $R_{Si} \ggg Normal$ - Obstrução das válvulas do LC (Al - Al_2O_3);

3.4 Defeitos em Produtos do Lingotamento Contínuo

A físico-química de fabricação e solidificação do aço é tão complexa que a produção de semi-acabados e produtos acabados completamente livres de defeitos torna-se praticamente impossível.

A avaliação da qualidade do tarugo lingotado se dá de acordo com diversos critérios. Todos eles, entretanto, buscam quantificar e qualificar a presença de defeitos de solidificação no produto, e sua permanência dentro da estreita faixa aceitável aos processos de conformação mecânica posteriores.

Segundo Baptista (1970), os defeitos de fabricação são classificados conforme a ocorrência no produto e são divididos em três classes principais, como mostra a Tabela 3.4:

Tabela 3.4 Relação de defeitos de solidificação usualmente avaliados.

CLASSIFICAÇÃO	TIPO DE DEFEITO
DEFEITO DE SUPERFÍCIE	TRINCAS NA SUPERFÍCIE INCRUSTAÇÃO DE ESCÓRIA POROSIDADE SUPERFICIAL PELE DUPLA E GOTA FRIA
DEFEITOS INTERNOS	POROSIDADE INTERNA MACROINCLUSÕES TRINCAS SEGREGAÇÃO E POROSIDADE CENTRAL
DEFEITOS DE FORMA	ROMBOIDADE DEPRESSÃO

Entre os defeitos citados, podem-se identificar alguns principais, cuja presença em produtos voltados para a indústria metal-mecânica pode impossibilitar os processos de conformação mecânica posteriores, ou ainda afetar severamente as propriedades mecânicas dos produtos finais.

Foi selecionada para avaliação a presença de porosidades internas “blow-holes”, pois estas estão diretamente relacionadas a não efetiva desoxidação do aço nos processos anteriores a solidificação.

3.4.1 Porosidade Interna – “Blow-Hole”

Os poros internos podem se apresentar em todos os tipos de aços e sistemas de lingotamento. A porosidade interna apresenta-se a alguns milímetros da pele do tarugo, em qualquer face. Normalmente tem forma alongada e a penetração ao interior do tarugo fica limitada.

A formação de porosidades no material lingotado continuamente é extremamente prejudicial à qualidade do produto final por uma série de fatores. Entre eles, cita-se a possibilidade dessas porosidades serem nucleadoras de trincas, concentradores de tensões e ainda, se estiverem oxidadas ao caldear durante a laminação, darão origem a defeitos superficiais críticos ao processo.

Existem diversos modelos baseados na físico-química que permitem avaliar as condições para evitar a formação de poros durante o lingotamento, citados por Palmaers (1979) e Begnis (2001) separadamente em seus trabalhos. Estes modelos se baseiam no

postulado que a formação de poros durante a solidificação do aço é uma consequência da microsegregação de soluto durante a solidificação dendrítica do aço líquido e a interação de soluto no líquido interdendrítico enriquecido por impurezas.

Os solutos dissolvidos no aço líquido que contribuem à formação de poros são, para o caso de aços lingotados sem injeção de argônio, o H, N e CO. Quando a soma das pressões parciais de equilíbrio destes solutos no líquido interdendrítico supera a pressão externa nesse ponto, se geram as bolhas de gás, resultando na expulsão do líquido interdendrítico e na formação de poros que logo ficam aprisionados e crescem dentro da rede de dendritas (VIDOLIN 2010).

Pode-se descrever o exposto mediante a equação [4]:

$$p_{H_2} + p_{N_2} + p_{CO} > P_s + P_f + 2\sigma/r \quad [4]$$

Onde:

p_{H_2} - pressão de vapor do Hidrogênio

p_{N_2} - pressão de vapor do Nitrogênio

p_{CO} - pressão de vapor do Monóxido de Carbono

P_s - pressão atmosférica sobre a superfície do aço líquido;

P_f - pressão ferrostática na localização do poro;

σ - tensão superficial do aço líquido em contato com a bolha de gás de raio r .

Para uma bolha de gás de 1mm de raio, por exemplo, a pressão em excesso devido à tensão superficial é só de 0,02-0,03 bar. Para o tamanho dos poros observados no tarugo, o efeito da tensão superficial torna-se insignificante.

A Figura 3.14 mostra esquematicamente o processo de crescimento das dendritas na zona líquida – sólida.

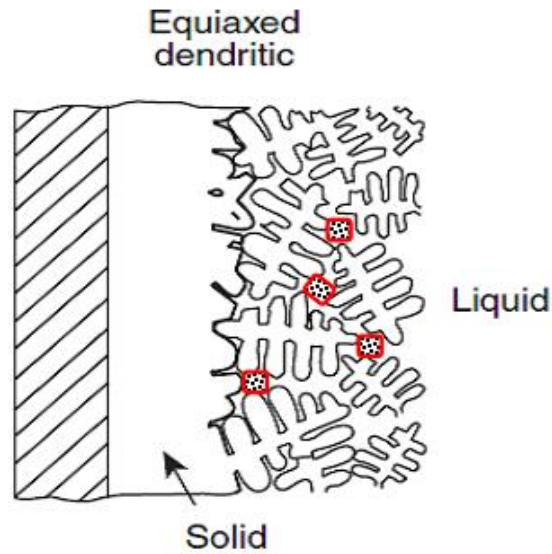


Figura 3.14 Crescimento de dendritas na região líquido-sólida. As áreas vermelhas indicam os sítios preferenciais para a nucleação de bolhas. - Fonte: Serra et al (2011) .

Com o crescimento da fração solidificada, há um enriquecimento progressivo de soluto no líquido remanescente retido entre os braços das dendritas. As porosidades surgem nesses pequenos volumes de líquido retido, onde a soma das pressões parciais dos gases pode superar o valor de P_{Total} .

É interessante observar a forma dos poros, em relação com o mecanismo de formação. A Figura 3.15 mostra que os poros têm forma arredondada e côncava onde começam, perto da pele; porém, onde os poros findam, a pressão ferrostática age na tentativa de fechar o poro, e o extremo do poro fica com forma convexa. Nesta parte existe segregação, própria do espaço interdendrítico.



Figura 3.15 Porosidade interna em corte transversal de tarugo, detalhe dos poros sob lupa estereoscópica 6X.

Para os aços ao Si-Mn, segundo Palmaers (1979), o problema de redução de porosidades passa por obter uma desoxidação suficiente para evitar a formação de poros sem dar lugar à obstrução da válvula da panela ou distribuidor por formação de inclusões parcialmente sólidas.

O procedimento de injetar arame de alumínio no molde pode ser uma solução para o problema, mas traz consequências, tais como inclusões duras, tendência à incrustação de escória, dificuldades para o controle do tamanho de grão, etc.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho assim como os materiais e equipamentos.

4.1 Materiais

4.1.1 Aço Analisado

Foram analisadas as corridas durante a produção do aço SAE 1006 com faixa de composição química apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Faixa de composição química para o aço SAE 1006, % em massa.

SAE 1006	C	Mn	Si	N₂
Mín.	-	0.3	0.05	-
Máx.	0.07	0.5	0.15	100*

*ppm (valor de referência).

Demais teores dos elementos encontrados no aço não serão mencionados no trabalho por motivos de sigilo da empresa.

4.1.2 Ferroligas

As ligas adicionadas nas corridas, que serão consideradas para os cálculos de rendimento de liga, estão representadas na Tabela 4.2, assim como suas composições químicas médias.

Tabela 4.2 Composição química média das ligas, % em massa.

	C	Mn	Si	Ca
FeSiMn	-	69	15	-
CaSi	-	-	60	35

Durante o vazamento no FEA, também foi utilizado alumínio como desoxidante do aço e CaC₂ como desoxidante da escória. A quantidade adicionada foi a mesma para todas as corridas analisadas, porém seu efeito não será avaliado neste trabalho.

4.2 Métodos

Primeiramente será descrito o método de coleta de dados e amostras na usina da Gerdau Riograndense. Em seguida a preparação das amostras para os demais testes. Por fim os testes em si que vão gerar os resultados do trabalho. Segue, na Figura 4.1, o fluxo metodológico.

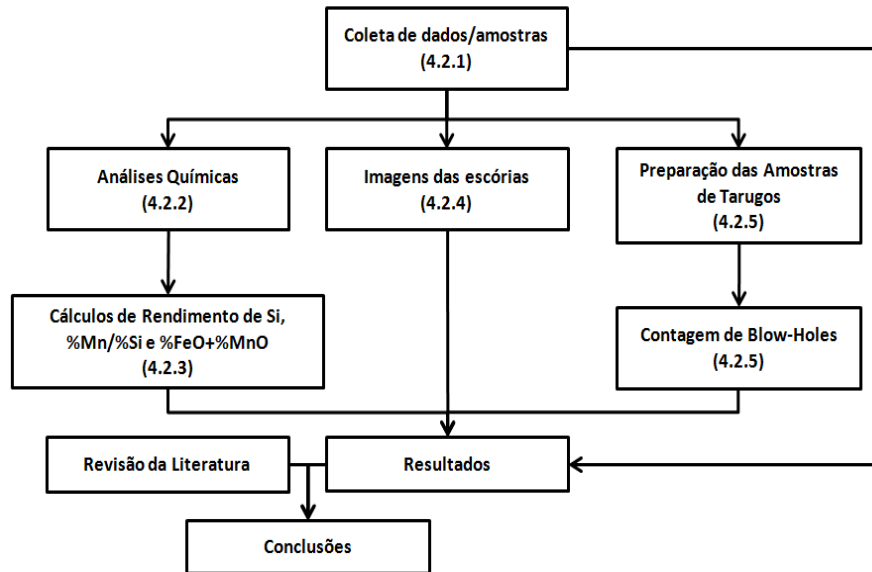


Figura 4.1 Fluxograma da metodologia do trabalho.

4.2.1 Coleta de dados/amostras

A Figura 4.2 ilustra como foram realizadas as amostragens nas cinco corridas analisadas. Em cada corrida foram retiradas três amostras de aço (prova A = antes do vazamento do FEA; prova B = após adição de CaSi no forno-panela; prova C = no distribuidor) e três amostras de escória (prova X = espumação da escória do FEA; prova Y = chegada ao forno panela; prova Z = saída do forno panela). Além disso, mediu-se a temperatura em três pontos (antes do vazamento do FEA, chegada ao FP e saída do FP), e somente em duas, a temperatura e o oxigênio ativo (chegada e saída do FP). Finalizando, foi retirada uma amostra do tarugo produzido para ser analisada.

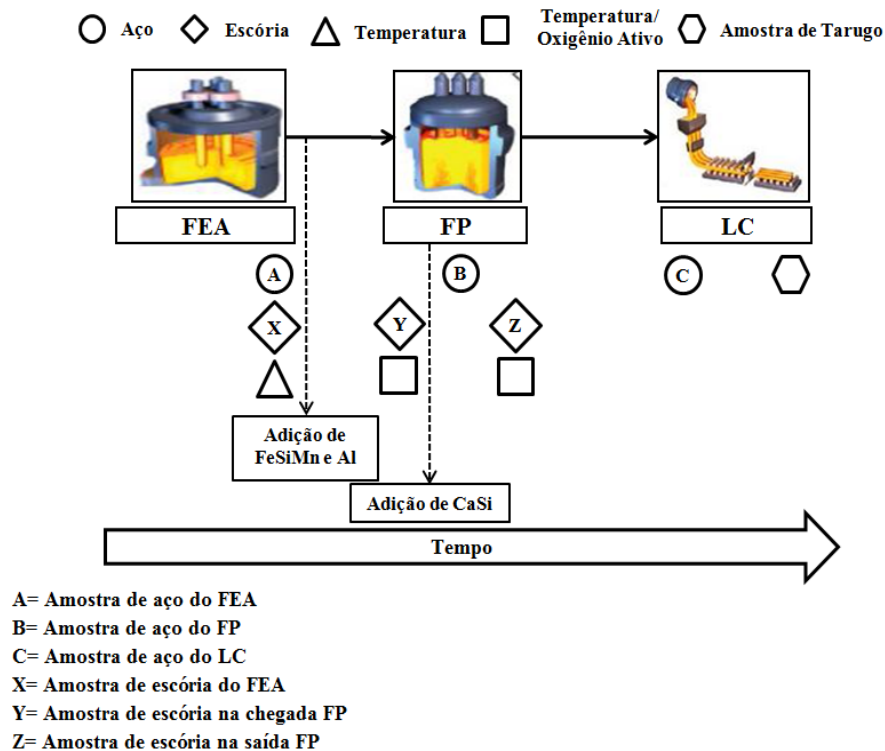


Figura 4.2 Esquema de retirada das amostras ao longo do processo.

A retirada das amostras de aço foi realizada no utilizando amostradores de imersão, fabricante ECIL MetTec, como mostra a Figura 4.3.

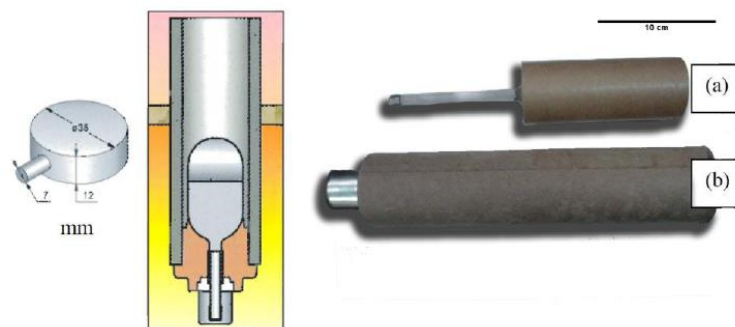


Figura 4.3 Amostrador de imersão para retirada das amostras de aço. (a) amostrador usado no distribuidor; (b) amostrador usado no FEA e FP – Fonte: Adaptado de BIELEFELDT (2005).

Diferentes sensores foram utilizados, como estão relacionados a seguir:

- Sensor Termotip, fabricante ECIL MetTec, para a medição de temperatura no FEA (Figura 4.4a).
- Medidor CELOX Heraeus Electro-Nite para temperatura e oxigênio ativo no FP (Figura 4.4b).



Figura 4.4 Medidor CELOX Heraeus Electro-Nite – Fonte: Adaptado de BIELEFELDT (2005).

As amostras de escória foram retiradas utilizando uma vara tubular que foi imersa na escória, Figura 4.5(a), fazendo com que a mesma ficasse aderida como mostrado na Figura 4.5(b).

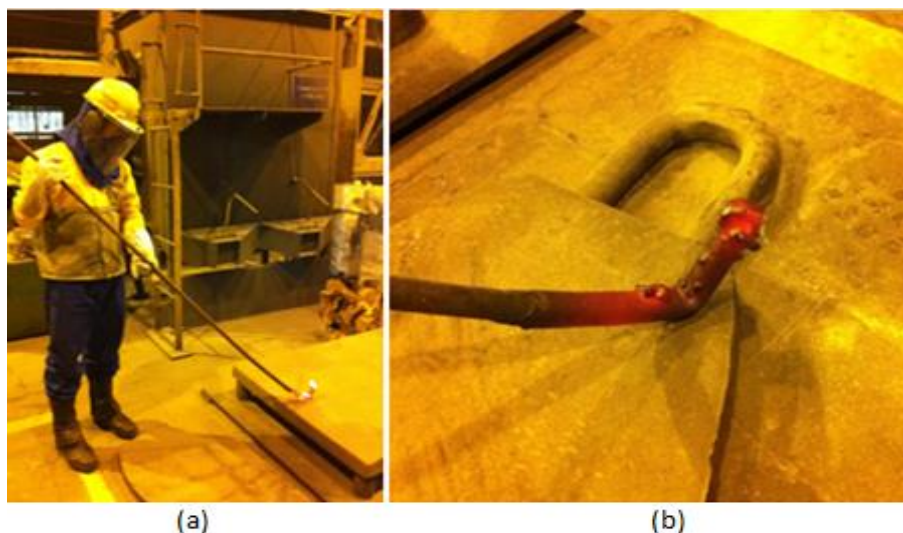


Figura 4.5 Escória aderida à vara instantes após a retirada.

4.2.2 Análises Químicas

A análise da composição química do aço foi realizada em cada etapa do processo durante a produção do aço através de um Espectrômetro de Emissão Óptica, modelo ARL 3460-AES.

As análises para determinação da composição química das escórias foram realizadas no setor de Desenvolvimento da Qualidade (DQ) da usina Gerdau Riograndense

utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X, modelo ARL ADVANT'X, após preparação prévia das amostras.

Para realização da análise do teor de oxigênio total no tarugo, foi utilizado o Analisador de Gases por combustão direta, modelo TC-136 da fabricante Leco.

4.2.3 Cálculos de Rendimento de Si, %Mn/%Si no aço e %FeO+%MnO na escória

Os cálculos de rendimento de silício foram realizados levando em conta o peso vazado das corridas, os teores de Si no aço em cada etapa do processo e as quantidades de Si nas ferro ligas adicionadas entre as amostragens, como mostra a equação [5]:

$$R_{Si} (\%) = \frac{(((-\%Si_A + \%Si_B) \cdot PV) \cdot 1000)}{(M_{FeSiMn} \cdot 0,15 + M_{CaSi} \cdot 0,60)} [5]$$

Onde:

- R_{Si} – Rendimento de silício;
- $\%Si_A$ – Teor de Si na amostra do FEA;
- $\%Si_B$ – Teor de Si na amostra do Forno Panela;
- PV – Peso vazado na corrida;
- M_{FeSiMn} – Massa de FeSiMn adicionada;
- M_{CaSi} – Massa de CaSi adicionada;

A relação %Mn/%Si foi obtida através dos valores encontrados na composição química das amostras de aço no forno panela. Estes resultados serão comparados com o oxigênio ativo na saída do forno panela, procurando avaliar a relação entre eles.

A relação %FeO+%MnO foi obtida através dos resultados das análise química da escória em cada amostra. Estes resultados serão relacionados com os níveis de oxigênio dissolvido no aço na chegada e saída do forno-panela.

4.2.4 Imagens das Escórias

As imagens das escórias foram capturadas durante a coleta das amostras em cada etapa do processo visando avaliar a evolução da composição química e coloração das mesmas.

4.2.5 Preparação das Amostras de Tarugo

Foi feito um corte transversal nas amostras obtidas de tarugos de, em média, 2 cm de espessura. Essas bolachas foram retificadas e identificadas para posterior observação.

A superfície da amostra foi dividida em 4 quadrantes conforme mostra a Figura 4.6 para mapeamento e contagem de “blow-holes” via Estereoscópio Zeiss com aumento de 8 vezes.

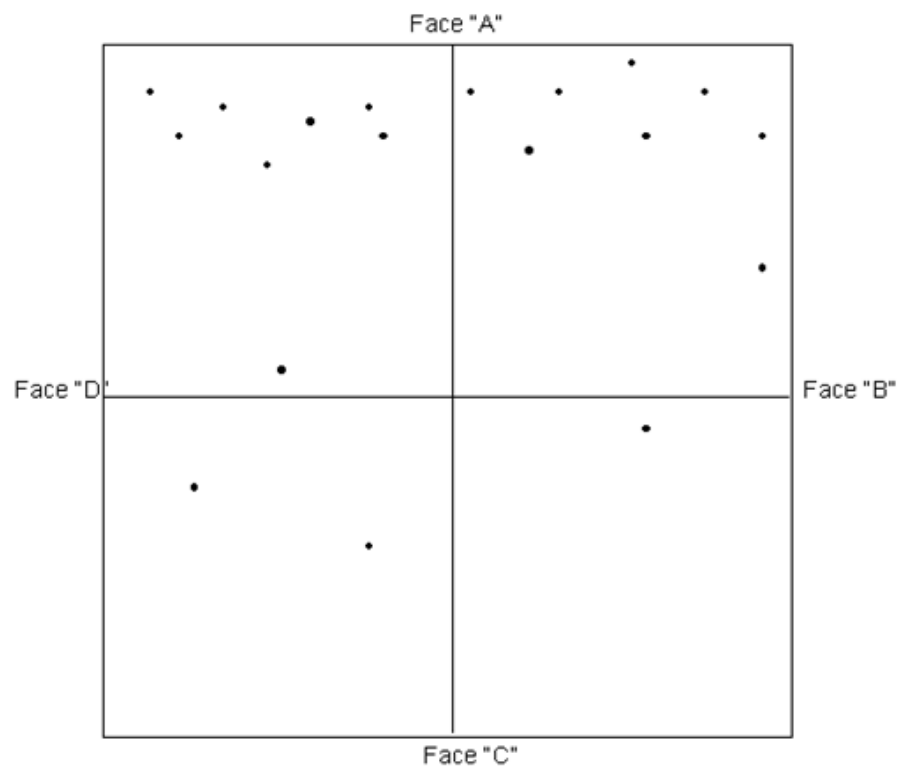


Figura 4.6 Divisão das secções do tarugo para análise de blow-holes.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados das medições de temperatura do aço, oxigênio ativo, e as análises de composições químicas do aço e escória ao longo do processo. Será discutido o comportamento entre os teores de oxigênio dissolvido com a temperatura, relação %Mn/%Si, rendimento de Si. Também será avaliado o nível de desoxidação do banho através da comparação com os teores de FeO e MnO na escória. Por fim, serão mostrados os resultados da análise de O_{total} no aço e a contagem de porosidades “Blow-Holes” no tarugo, onde será realizada comparação entre os dados e posteriormente o número de porosidades será comparado com o oxigênio ativo na saída do FP e rendimento de Si calculado.

5.1 Dados e Amostras Coletadas

Para as cinco corridas analisadas, a quantidade de aço produzida e as quantidades de ferro ligas adicionadas para desoxidação do aço são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Produção de aço e quantidades de ferroligas utilizadas em cada corrida analisada.

Corrida	Produção (t)	FeSiMn (kg)	CaSi (kg)
1	21,7	110	18
2	21,8	110	18
3	21,4	110	18
4	22,3	110	18
5	24,4	110	18

Pode-se ver que a quantidade de aço produzida é variável em cada corrida. Esse fato deve-se a prática operacional exercida por cada forneiro durante o processo, que busca otimização dos parâmetros de produção do FEA. Já as quantidades de ferro ligas foram adicionadas como mostra o padrão para produção do aço na usina.

5.1.1 Evolução da Temperatura no Processo

Conhecer valores da temperatura em cada etapa do processo de produção é importante, pois ela influi nas reações químicas que ocorrem entre o aço líquido e a escória, assim como nas condições de solidificação do aço dentro do molde no lingotamento contínuo (BRUCH 2012).

A Figura 5.1 mostra a evolução da temperatura ao longo do processo para as corridas analisadas.

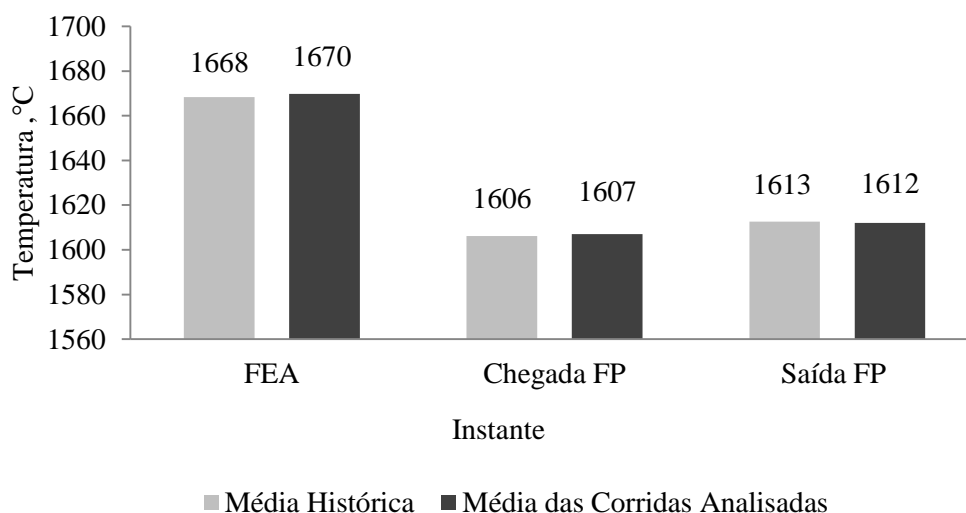


Figura 5.1 Evolução de temperaturas para a média das corridas analisadas e média histórica ao longo do processo.

Comparando os valores históricos com os obtidos durante as análises, é possível constatar que as temperaturas das corridas analisadas estão de acordo com o processo rotineiro desta qualidade.

A queda na temperatura do aço, do momento de vazamento do FEA até a chegada ao FP, é influenciada significativamente pela perda de calor por condução para a parede interna da panela em contato com o aço mais a perda líquida por radiação da escória para a parede, que são governadas pela diferença de temperatura existente entre as mesmas (CHRIST 2001). Outros fatores devem ser considerados para essa perda de temperatura, como a adição de ligas e a exposição do aço durante o vazamento no FEA.

Podemos observar também que há um aumento da temperatura do aço entre a chegada e saída do FP. Essa elevação é realizada sempre que necessário, pois o forno

panela é a última etapa do processo onde pode ser feito o ajuste na temperatura antes do lingotamento contínuo.

A Tabela 5.2 mostra mais detalhadamente as temperaturas de cada amostra nas diferentes etapas analisadas.

Tabela 5.2 Temperatura do aço das corridas em cada etapa analisada.

Corrida	Temp. Vazamento FEA (°C)	Temp. Chegada FP (°C)	Temp. Saída FP (°C)
1	1683	1627	1606
2	1679	1623	1627
3	1649	1579	1606
4	1683	1611	1611
5	1655	1595	1610

Observando as temperaturas de chegada ao FP, podemos perceber que as amostras 1 e 2 apresentaram uma diferença significativa em relação as amostras 3 e 5. Para as temperaturas de saída do FP, podemos destacar a amostra 2, que apresentou grande diferença para as demais, inclusive tendo valor acima do padrão estabelecido pela empresa. Os efeitos disso serão mostrados em análises posteriores.

5.1.2 Análise de Oxigênio Ativo

Zhang, Thomas (2003) cita em seu trabalho que o O_{total} é a soma do O_{ativo} (dissolvido no banho) e o oxigênio formador de inclusões. Destaca-se que, quanto maior o nível de oxigênio ativo, maiores serão os níveis de inclusões e bolhas durante a solidificação do aço. A Figura 5.2 mostra os resultados medidos para O_{ativo} na chegada e saída do FP das amostras.

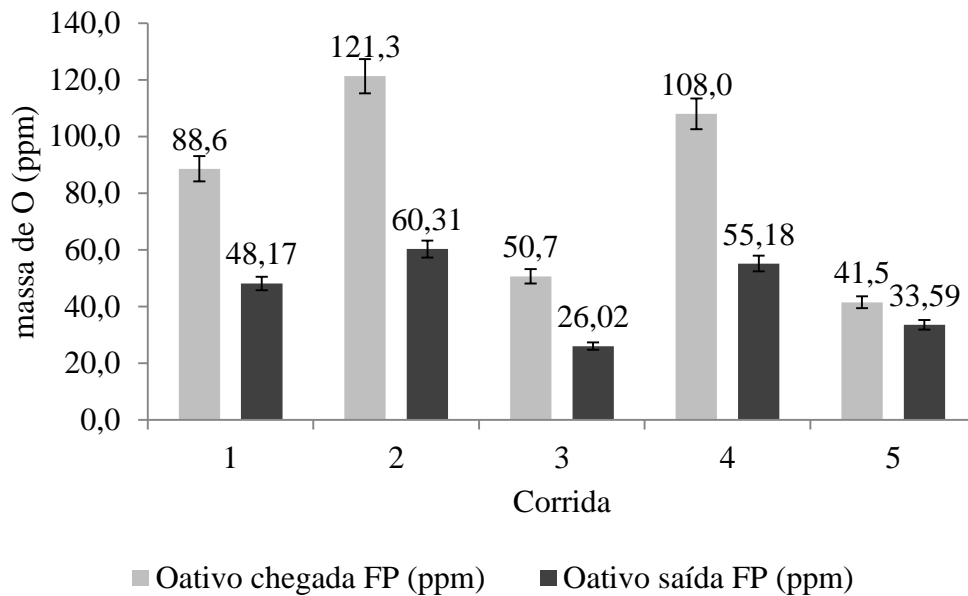


Figura 5.2 Resultados de O_{ativo} na chegada e saída do FP das corridas analisadas.

Analisando o O_{ativo} das amostras, podemos notar que já ocorreu desoxidação antes da chegada ao FP em todas as corridas, visto que o aço sai do FEA com O_{ativo} na ordem de centenas de ppm. Contudo, para garantia de boa qualidade do aço fabricado, são necessários níveis ainda menores de O_{ativo} . Tais níveis são alcançados através de um controle adequado da temperatura do aço líquido e a garantia da evolução das reações de desoxidação no banho, através da adição de desoxidantes durante o refino secundário, como CaSi, e utilização de uma escória adequada para o processo.

5.1.3 Temperatura x Oxigênio Ativo

A Figura 5.3 mostra a relação entre o oxigênio ativo e a temperatura do aço, medidos na saída do forno panela nas corridas analisadas.

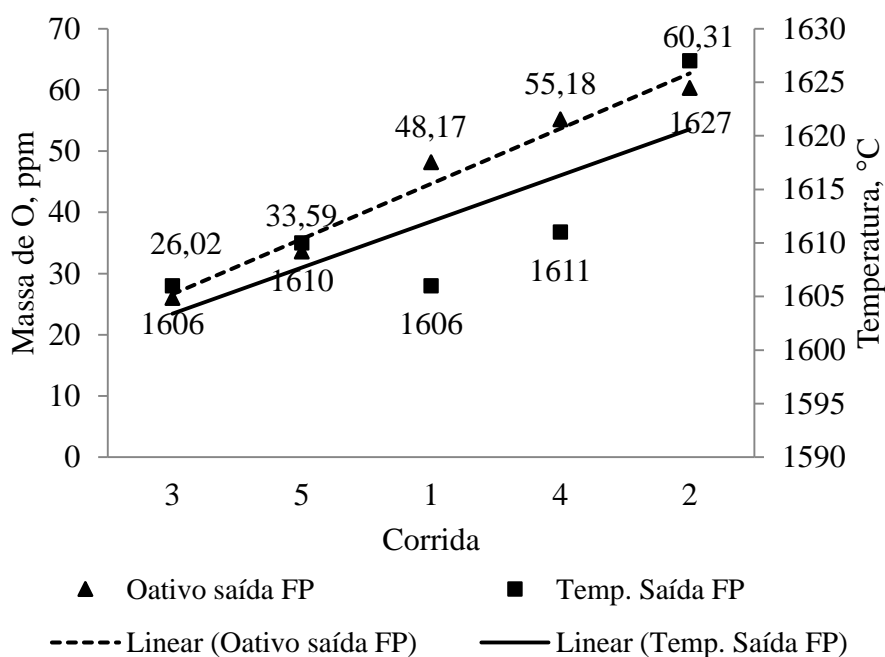


Figura 5.3 Relação O_{ativo} e temperatura do aço de saída do FP das corridas analisadas.

Pode-se constatar, através da linha de tendência do O_{ativo} , que as amostras analisadas tiveram o comportamento esperado, ou seja, houve aumento do teor de oxigênio dissolvido com a elevação da temperatura do aço líquido.

Embora as temperaturas do aço medidas nas amostras 1 e 3 apresentaram os mesmos valores, há uma diferença significativa nos valores de oxigênio dissolvido encontrados. Esse fato também pode ser evidenciado nas corridas 4 e 5, onde houve uma diferença de mais de 20ppm de oxigênio para um aumento de 1°C na temperatura. Esse comportamento pode ser explicado pela efetividade do desoxidante utilizado, ou seja, pela quantidade de elementos desoxidantes em equilíbrio no aço apresentado por essas amostras depois de atingido o equilíbrio químico entre banho e a escória. Também pode ser sugerido a influência do baixo teor de carbono apresentado pela amostra 2, vide tabela 5.3, com isso a solubilidade do oxigênio em equilíbrio tende a aumentar.

5.2 Análise Química do Aço

Faz-se necessário o conhecimento da composição química do aço nas corridas analisadas nas diferentes etapas do processo, visto que a concentração de cada elemento

dissolvido no banho modifica a atividade de outro, contribuindo para desoxidação. Assim como a concentração de N₂ que pode contribuir para a formação de porosidades internas. Sendo assim, destaca-se para análise os elementos desoxidantes e o nitrogênio, como mostra a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Composição Química das amostras de aço nas diferentes provas, % em massa.

Corrida	Prova	C	Mn	Si	N ₂ (*)
1	A	0,051	0,083	0,011	75,85
	B	0,048	0,310	0,090	85,62
	C	0,061	0,418	0,092	83,73
2	A	0,041	0,061	0,004	77,27
	B	0,053	0,320	0,087	95,21
	C	0,049	0,378	0,104	85,74
3	A	0,037	0,059	0,005	69,87
	B	0,064	0,296	0,104	74,41
	C	0,067	0,394	0,108	78,75
4	A	0,047	0,056	0,006	70,35
	B	0,050	0,300	0,081	84,82
	C	0,061	0,356	0,085	73,28
5	A	0,064	0,066	0,006	91,66
	B	0,068	0,335	0,112	93,29
	C	0,067	0,398	0,093	88,56

*ppm(valor de referência)

Comparando os resultados de composição química do aço encontrados na prova C com os teores estabelecidos para a produção do aço, nota-se que nenhuma amostra encontra-se fora da faixa de produção da aciaria. Portanto, as corridas em questão são representativas do processo, em termos de composição química do aço.

Observa-se que em todas as corridas há um aumento do teor de manganês e silício da prova A em relação à prova B. Isso se deve a dissolução dos elementos desoxidantes adicionados durante o vazamento de aço do FEA para a panela.

A elevação do teor de nitrogênio entre as amostras A e B, sugere que houve a incorporação deste durante o vazamento no FEA, influenciada pela elevada taxa de desoxidação ou ainda pela utilização de baixa pressão e tempo de rinsagem, como

mencionado na revisão. Contudo, os valores encontrados estão dentro da faixa de composição química estabelecida.

5.2.1 Relação %Mn/%Si

Como mencionado na revisão, o uso combinado de Si e Mn na desoxidação é mais eficiente do que o isolado de Si ou Mn. Este resultado se justifica pelo MnO reduzir a atividade da SiO₂.

A relação %Mn/%Si pode ser utilizada para análise de quanto o banho está oxidado. Aumentando-se a relação %Mn/%Si, ou seja, muito manganês e pouco silício em equilíbrio no aço, a relação %SiO₂/%MnO nas inclusões diminui, ou seja, menos desoxidado está o aço. Por outro lado, reduzindo-se a relação %Mn/%Si, a tendência será de %SiO₂/%MnO aumentar, diminuindo os teores de oxigênio ativo.

Este comportamento pode ser observado na Figura 5.4, utilizando os dados de composição química do aço e oxigênio ativo na saída do FP das corridas analisadas.

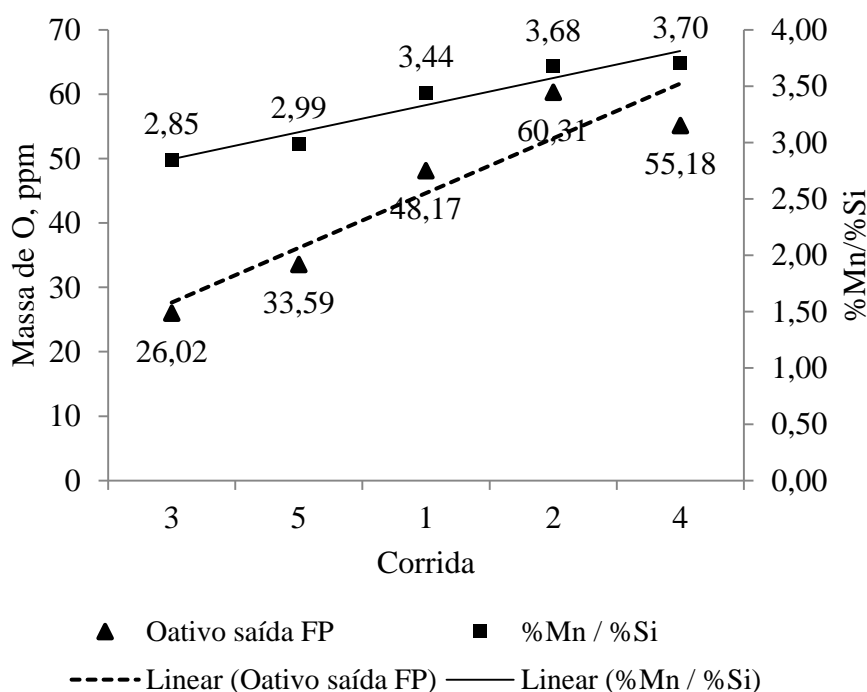


Figura 5.4 Relação entre o O_{ativo} e %Mn/%Si de saída do FP das corridas analisadas.

Pode-se verificar que as corridas que apresentaram valores mais elevados da relação %Mn/%Si, tiveram maiores teores de oxigênio dissolvido.

No caso de %Mn/%Si, é fundamental atender o valor estabelecido para que haja formação de inclusões líquidas durante o lingotamento. Valores baixos de %Mn/%Si favorecem a formação de inclusões sólidas de sílica (SiO₂), que podem causar obstrução na válvula gaveta da panela e na válvula do distribuidor, além de descentralização do jato de aço do distribuidor para o molde.

5.2.2 Rendimento de Si

Um elemento de liga ao ser adicionado ao aço pode permanecer como liga(dissolvido) ou formar um óxido. O óxido é gerado pela reação com o oxigênio dissolvido do aço, com o %FeO+%MnO da escória ou até por reoxidação com o ar (FALCONI 1980). Um rendimento de 100% do elemento adicionado para desoxidação seria obtido se todo elemento estivesse somente dissolvido no banho.

Os resultados dos cálculos de rendimento de silício, entre as diferentes etapas do processo, são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Rendimento de silício calculado para as diferentes etapas do processo.

Corrida	Rendimento de Si (%)	
	A-B	TOTAL (A-C)
1	58,4	59,9
2	64,6	77,8
3	73,5	76,5
4	59,8	63,0
5	80,6	66,2

Pode-se observar que houve uma diferença significativa entre os resultados encontrados de rendimento de Si entre as provas A-B. As amostras 3 e 5 apresentaram valores superiores a 10% em relação as demais. Esse comportamento pode ser justificado pelas menores temperaturas do aço apresentadas durante o processo por essas corridas, favorecendo o rendimento, pois há uma menor quantidade de oxigênio dissolvido no banho.

Analisando os resultados do rendimento de Si total, ou seja, entre as prova A-C, pode-se observar que as quatro primeiras amostras tiveram, após liberação no forno-panela, um rendimento adicional de Si, com destaque para amostra 2. Esse comportamento pode estar ligado a utilização de elementos desoxidantes de escória no forno panela. Com a

desoxidação da escória, o equilíbrio químico entre aço e escória é deslocado para a formação de óxidos, ou seja, desoxidação do banho.

Já a amostra 5 apresentou comportamento contrário, havendo uma reoxidação do silício dissolvido no aço. Este comportamento sugere que houve exposição do aço ao ar. Utilizar rinsagem branda para evitar abertura do olho e proteger o jato de aço na transferência da panela para o distribuidor com uma válvula submersa, podem garantir condições de não reoxidação do banho.

A Figura 5.5 mostra a relação estabelecida para as amostras analisadas, entre o rendimento de Si calculado e o teor de O_{ativo} .

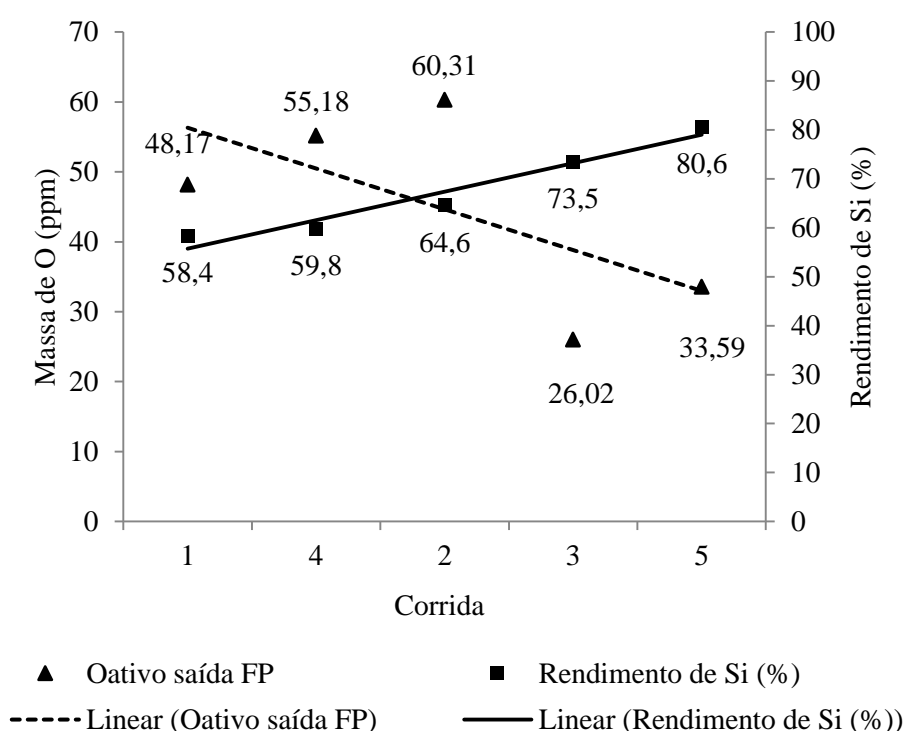


Figura 5.5 Relação entre o O_{ativo} e rendimento de Si calculados na saída do FP das corridas analisadas.

Pode-se observar que há uma tendência de diminuição dos teores de oxigênio ativo a medida que o rendimento de Si é mais efetivo. Porém, analisando as amostra, individualmente, percebe-se disparidades no comportamento. A amostra 2, mesmo apresentando rendimento de Si maior que a amostra 4, possui maior teor de oxigênio dissolvido medido. Esse mesmo comportamento ocorre entre as amostras 3 e 5. Analisando o gráfico da Figura 5.3, percebemos que essas corridas apresentaram temperaturas do banho mais elevadas, possibilitando maiores quantidades de oxigênio no aço.

Portanto, corridas onde o rendimento de Si apresenta valores baixos, nos indicam que não houve uma desoxidação adequada do aço, ou seja, a corrida necessita ser trabalhada, ainda no FP, para que não haja defeitos no produto final, proveniente dos gases dissolvidos.

5.3 Análise das Escórias

A seguir serão mostrados e discutidos os resultados das análises de composição química das escórias nas três provas de cada corrida e também a evolução dos óxidos presentes nela ao longo do processo. Será mostrado a relação entre o nível de desoxidação do banho com os teores de %FeO+%MnO presentes na escória durante a etapa de refino secundário. Por fim, serão comparados os teores de FeO e MnO nas escórias com a coloração apresentada por elas.

5.3.1 Composição Química da Escória

A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos nas análises de composição química das escórias realizado em cada amostra

Tabela 5.5 Resultados da análise de composição química das escórias ao longo do processo em cada amostra, % em massa.

Corrida	Prova	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	FeO
1	X	7,6	3,8	15,9	30,8	5,3	36,3
	Y	8,4	10,0	23,3	47,6	3,6	6,3
	Z	9,5	9,4	29,7	50,3	2,5	2,3
2	X	8,2	2,9	12,9	29,4	5,0	40,2
	Y	8,0	8,5	23,5	43,4	5,0	10,5
	Z	9,5	8,0	30,9	47,1	3,7	2,8
3	X	9,8	3,5	14,3	30,5	5,2	38,8
	Y	8,9	10,9	25,7	53,6	2,5	3,6
	Z	9,3	11,3	31,4	51,1	1,8	1,4
4	X	7,3	3,3	12,8	29,9	5,3	39,2
	Y	7,1	9,9	23,3	47,6	4,7	7,4
	Z	7,7	8,8	31,1	47,9	3,2	2,7
5	X	6,4	2,3	10,9	23,5	5,1	48,7
	Y	7,7	11,1	22,6	50,1	3,0	4,9
	Z	8,9	11,1	29,8	49,8	2,1	2,5

A Figura 5.6 mostra a evolução da composição química média dos óxidos presentes na escória nas três etapas do processo onde foi realizada amostragem. Essa análise pode ser interpretada de modo a estimar a absorção das inclusões pela escória.

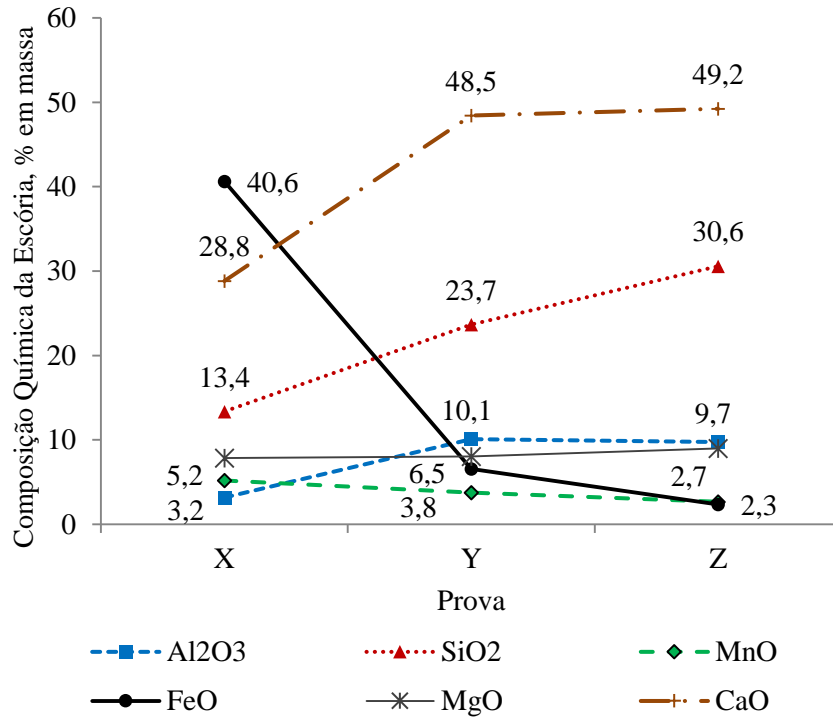


Figura 5.6 Evolução da composição química média da escória das corridas analisadas nas diferentes etapas do processo.

Analisando a evolução do FeO, pode-se constatar que há uma grande queda do seu teor entre as prova X e Y. Esse comportamento é fruto da intensa desoxidação nessa etapa, que ocorre através da adição de FeSiMn e Al durante o vazamento do FEA, causando a formação dos óxidos produtos da desoxidação, ou seja, gerando aumento dos teores de SiO₂ e Al₂O₃. Também pode ser observada uma diminuição do teor de MnO, favorecida pela maior afinidade do oxigênio pelo silício e alumínio.

Comparando as provas Y e Z, pode-se observar que os teores dos óxidos FeO e MnO continuam decrescendo em relação as provas X e Y, assim como há o contínuo aumento dos teores de sílica na escória, mostrando que a desoxidação do aço ainda está ocorrendo. A utilização de CaSi durante o refino secundário, além de contribuir na desoxidação, atua como um excelente modificador de inclusões, principalmente naqueles aços em que Al₂O₃ é produto da desoxidação, transformando inclusões sólidas em produtos líquidos, chamados de cálcio-aluminatos (BIELEFELDT, 2005). Essa contribuição do

CaSi pode explicar a diminuição do teor de Al_2O_3 na prova Z, após sua adição e favorecida pela utilização de rinsagem branda.

5.3.2 $O_{ativo} \times \%FeO+\%MnO$

Um bom indicativo para o nível de oxidação do banho é a presença de valores elevados para os óxidos FeO e MnO na escória. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os efeitos dos teores de $\%FeO+\%MnO$ em relação ao oxigênio dissolvido nas provas Y e Z das corridas analisadas.

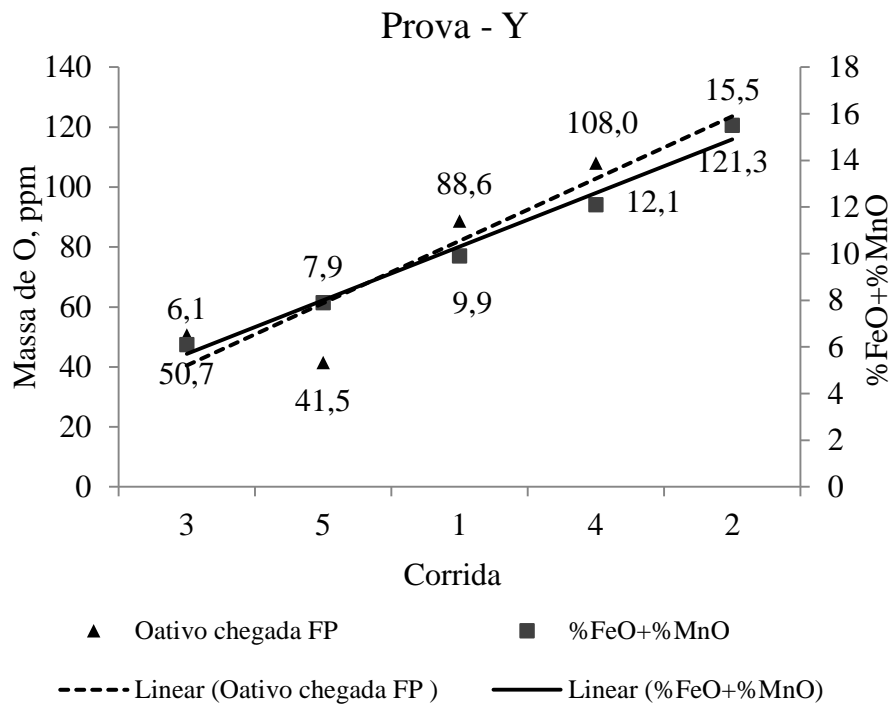


Figura 5.7 Relação do O_{ativo} com os teores $\%FeO+\%MnO$ na prova Y.

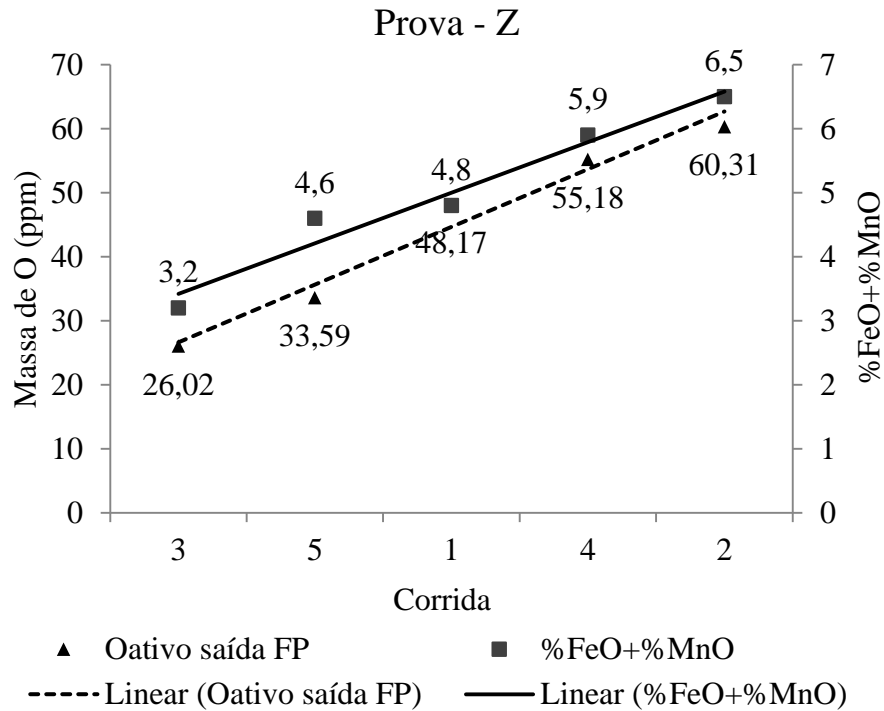


Figura 5.8 Relação do O_{ativo} com os teores %FeO+%MnO na prova Z .












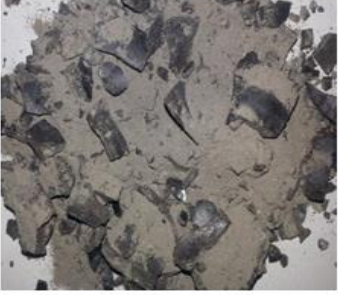



Pode-se evidenciar pela tendência que o comportamento é o mesmo para as duas provas, ou seja, quanto maior os teores %FeO+%MnO presente na escória, maior o oxigênio dissolvido no aço. Esse comportamento é relatado por Zhang, Thomas (2003) em seu trabalho.

5.3.3 Análise Visual da Escória

A coloração da escória é um meio simples, embora impreciso, de avaliar o progresso da desoxidação no processo. Segundo Scal (2013), enquanto houver teores de FeO e MnO na escória a coloração não será branca.

A Tabela 5.6 mostra a evolução da coloração das amostras de escória nas três provas analisadas do processo.

Tabela 5.6 Evolução da coloração das amostras de escória nas três provas analisadas.

Corrida	Prova		
	X	Y	Z
1			
2			
3			
4			
5			

Primeiramente, observando as imagens da prova X, é possível constatar que a coloração preta predomina em todas as amostras, além de apresentarem um aspecto poroso na sua superfície. Comparando com os resultados da composição química da escória apresentados na Tabela 5.5, constata-se que essa coloração é influenciada pelo alto teor de FeO, comprovando os elevados níveis de oxigênio.

Na prova Y, observamos que as amostras já apresentam a coloração marrom juntamente com o preto. Nessas amostras os teores de FeO e MnO já são menores, fruto da desoxidação que está acontecendo. O resultado disso pode ser evidenciado nas amostras 3 e 5, que possuem os menores teores de FeO e MnO na escória e são caracterizadas por uma coloração entre marrom e cinza. Já as amostras 1, 2 e 4 apresentam coloração entre preto e marrom, influenciadas pelos maiores teores de FeO e MnO apresentados.

A prova Z, retirada na liberação da panela para o lingotamento contínuo, apresenta os menores valores de %FeO+%MnO, alcançados através da desoxidação. Podemos destacar as amostras 2 e 3, que apresentaram a maior e a menor relação %FeO+%MnO, respectivamente. O efeito disso pode ser observado em suas colorações, marrom para a amostra 2 e uma coloração “bege” para a amostra 3. As demais amostras tiveram comportamento intermediário.

Portanto, ainda que sem precisão, pode-se utilizar a análise visual da escória como ferramenta de auxílio para determinação do nível de desoxidação da corrida. Escórias com coloração clara indicam baixos teores de %FeO+%MnO, ou seja, oxidação menos acentuados. Já escórias com coloração escura, sugerem que os teores dos óxidos FeO e MnO são maiores. A fim de diminuir esses níveis de oxidação da escória, podem ser utilizados desoxidantes de escória, como o carbureto de cálcio (CaC_2), diminuindo os teores de FeO e MnO.

5.4 Análise nos Tarugos

A seguir serão mostrados e discutidos os resultados da análise de contagem de porosidades “Blow-Holes” e análise do O_{Total} no targuos. Por fim, será realizada comparação entre o número de blow-holes, rendimento de Si calculado e a quantidade de O_2 ativo medido na saída do FP.

A Tabela 5.7 mostra os resultados da contagem de porosidades “Blow-Holes” e análise do oxigênio total realizadas nas amostras de tarugo.

Tabela 5.7 Resultado da análise do O_{Total} e da contagem de porosidades “Blow-Holes” nos tarugos analisados.

Corrida	Contagem de Blow-Holes	Ototal Tarugo (ppm)
1	55	172
2	89	187
3	13	156
4	72	181
5	21	169

Percebe-se que em todas as corridas ocorreu a formação de blow-holes durante a solidificação do aço.

A Figura 5.9 mostra a comparação entre os resultados da análise de O_{total} nos tarugos e o número de porosidades formadas.

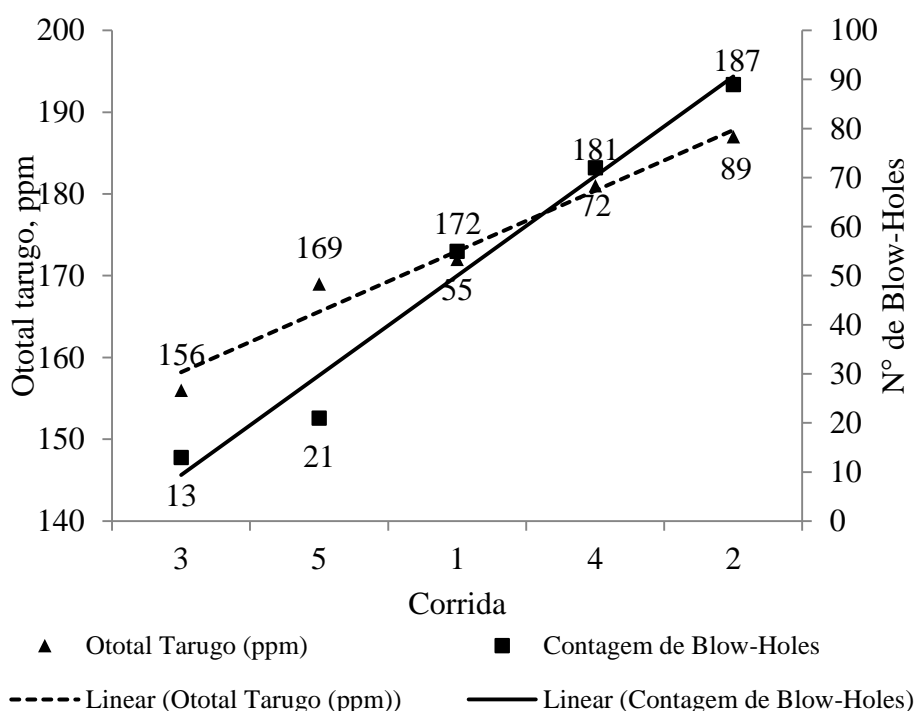


Figura 5.9 Relação entre O_{Total} e números de blow-holes contados no tarugo.

Pode-se observar que quanto maior a quantidade de O_{total} no tarugo, maior foi o número de porosidades formadas.

Uma vez que o oxigênio total é a soma do oxigênio ativo e o oxigênio presente nas inclusões, a tendência do gráfico sugere que quanto maior os níveis de oxigênio dissolvido (formador de gases) no aço, maior será a quantidade de porosidades formadas.

A Figura 5.10 apresenta o gráfico comparativo entre a quantidade de O_{ativo} e rendimento calculado na saída do FP, com o número de porosidades contadas no tarugo.

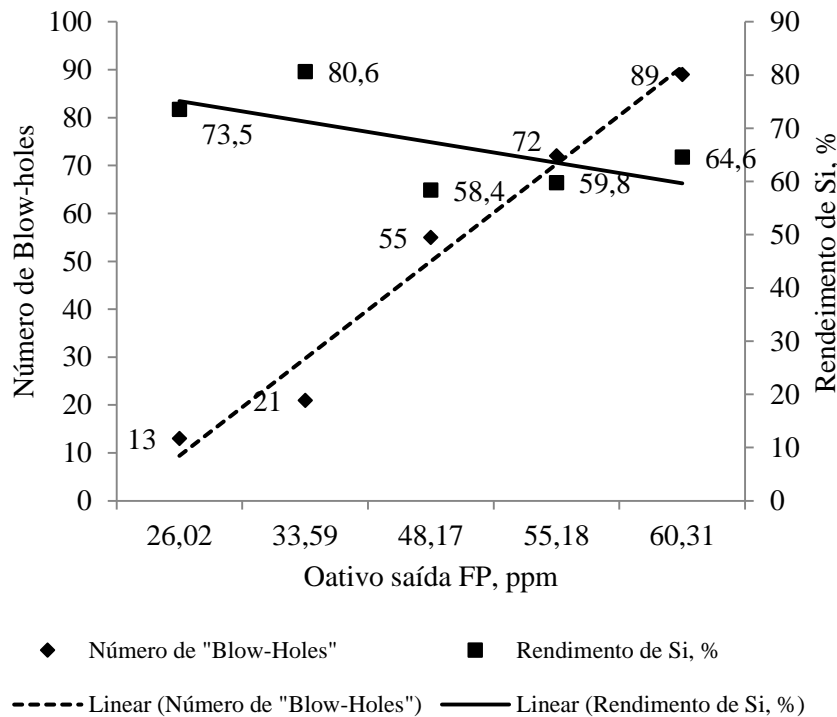


Figura 5.10 Relação entre O_{Total} e números de blow-holes contados no tarugo.

Pode-se constatar que quanto maior o número de porosidades formadas durante a solidificação, maior foi o oxigênio ativo no aço na etapa anterior ao lingotamento contínuo, influenciados pelos menores rendimentos de Si apresentados pelas corridas.

Segundo Serra et al(2011) esse aumento do número de porosidades deve-se a evolução do gás CO durante a solidificação. Desta forma, deve-se manter o nível de oxigênio dissolvido no aço o menor possível. Portanto, o rendimento de Si mostra-se uma boa ferramenta no controle da oxidação da corrida, podendo ajudar a minimizar consideravelmente o número de porosidades internas no produto final.

6.0 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no estudo foi possível concluir:

- Houve uma tendência de aumento da quantidade de oxigênio dissolvido no aço à medida que as temperaturas de trabalho registradas foram maiores;
- A relação %Mn/%Si apresentou o comportamento esperado, ou seja, quanto mais elevados os valores de %Mn/%Si no aço, maiores os teores de oxigênio dissolvido.
- As corridas que apresentaram maior rendimento de Si, assim como uma temperatura adequada de trabalho, registraram os menores níveis de oxidação do aço;
- A quantidade de %FeO+%MnO na escória, registrados tanto na chegada quanto na saída do forno-panela, foi maior nas corridas que tiveram os maiores níveis de oxigênio ativo registrado.
- A análise visual da escória mostra que corridas menos oxidadas apresentam coloração mais clara, devido aos baixos teores de FeO e MnO presentes. Já as corridas com níveis maiores de oxigênio no banho, apresentam coloração escura, influenciada pelos teores mais elevados de FeO e MnO presentes. Desta forma, mesmo que sem precisão, a análise visual da escória pode ser utilizada como um indicativo do nível de oxidação da corrida.
- As amostras de tarugos que apresentaram o maior número de porosidades foram aquelas onde o oxigênio total medido registrou os maiores valores.
- Com o aumento do rendimento do Si, foram registrados menores valores na contagem de porosidades. Consequência dos menores teores de oxigênio no banho. Desta forma, o rendimento de Si pode ser utilizado como uma ferramenta no controle da formação de porosidades no produto final.

7.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser aprofundado e complementado a partir das seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência do nitrogênio e hidrogênio para a formação de porosidades no produto solidificado, assim como métodos para evitar a incorporação destes gases no aço.
- Avaliar a influência da utilização de um desoxidante de escória, assim como a melhor etapa do processo para sua adição, buscando maior eficiência na desoxidação do aço.
- Analisar e caracterizar as inclusões formadas durante o processo de fabricação desta qualidade de aço, relacionando-as com os níveis de oxidação do aço e os desoxidantes utilizados.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAPTISTA, L. A. S. **Curso de Solidificação**. Apostila não publicada, 1970.
- BEGNIS S.S, RIBOLDI H, USART J. **Medición de temperatura superficial del planchón durante el enfriamiento secundario**. 13° Seminario de Acería del IAS, Buenos Aires, Argentina, Noviembre 2001, 277-284.
- BIELEFELDT, W.V. **Estudo do tratamento de inclusões com cálcio na fabricação do aço SAE 8620**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2005.
- FALCONI, V.C. **Tecnologia de Fabricação de Aço Líquido**. UFMG, 1980.
- FINARDI J, HANSEN J. P. **Refino secundário de aços em combinação com fornos elétricos a arco**. Contribuição apresentada no IV Seminário Anual de Fornos elétricos, ABM-COFOR, Rio de Janeiro, agosto de 1981.
- FINARDI, J. **Inclusões em aços: seu efeito e seu controle**. Apostila não publicada, 1984.
- FRUEHAN, R.J. **Ladle Metallurgy Principles and Practices**. Iron and Steel Society, 1985.
- GAYE, H. **Inclusion formation in steels. The making, shaping and treating of steel**, v.3, Casting. Ed. A.W. Cramb and M. Byrne, AISE, 2003.
- GERDAU - **Aciaria ACI – 048 Metalurgia Aplicada ao Forno Panela**. Sistema de Capacitação Industrial, Revisão B 05/12/2007.
- GHOSH, A. **Secondary Steelmaking – Principles and Applications**. CRC Press LLC, 2001.
- KIESSLING R, LANGE N. **Non metallic inclusions in steels**. London: The Metals Society, 1968.
- LÚCIO, A. **Físico-química metalúrgica – 2ª Parte**. Belo Horizonte: UFMG, 1981.
- MOURÃO, M. B et al. **Introdução a Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- PALMAERS A, DEFAYS J, PHILLIPE L. **Deoxidation of Continuously Cast Low Carbon Steel for Billets**. C.R.M. Bulletin No. 55, November 1979, 16-23.
- SCAL, M. W. **Refino secundário**. In: *Curso Capacitação Avançada de Engenheiros*. São Paulo: Gerdau, 2008.
- SERRA J.G, SCAL M.W, FERREIRA F. **Modelagem da Formação de Porosidades na Solidificação de Tarugos pelo Programa THERMO-CALC**. Tecnologia Metalúrgica, Materiais e Mineração, São Paulo, 2011, 99-108.
- TURKDOGAN E.T. **Fundamentals of Steelmaking**. The Institute of Materials, Londres, 1996.

VIDOLIN R.L, SOUZA B.R.M. **Defeitos em Tarugos – Apostila sobre Defeitos em Tarugos Lingotados.** Gerdau Araçariguama, São Paulo, 2010.

ZHANG L, THOMAS B.G. **State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness.** ISIJ International, v.43, n.3, p.271-291, 2003.