

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de mestrado

ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO
DE AÇO LD, UTILIZANDO FERRO-GUSA
LÍQUIDO COM BAIXO
TEOR DE SILÍCIO.

Autor: Wanderlei Miguel Gonçalves
Orientador UFMG: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro
Co-orientador: João Baptista Romão

Abril/2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Wanderlei Miguel Gonçalves

ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇO LD,
UTILIZANDO FERRO-GUSA LÍQUIDO COM BAIXO TEOR DE SILÍCIO

Dissertação de Mestrado a ser 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-orientador: João Baptista Romão

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Abril/2005

Dedicatória:

À minha mãe e ao meu pai, Maria de Lourdes Lopes Gonçalves e Jacob Gonçalves, pelos ensinamentos e exemplo de vida, sobretudo humildade e honestidade como ponto de partida para o meu crescimento como pessoa.

À minha esposa Fátima, aos meus filhos Rafael e Daniel, pela compreensão da minha ausência em alguns momentos em que estive dedicando a esse trabalho.

Agradecimentos:

À Belgo, nas pessoas do Gerente geral da Usina de Monlevade, Eng^o Gerson Alves Menezes, Eng^o João Garcia Ramalho, Gerente da área de qualidade, Wellerson Júlio Ribeiro, Gerente da aciaria, e ao Eng^o Marco Antônio Macedo Bosco, Chefe de Departamento da aciaria, pelo incondicional apoio e confiança.

Ao Colegiado da Escola de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Professores Ronaldo Barbosa, Roberto Parreiras, Varadarajan Seshadri, Luiz Fernando e Afonso, pelos conhecimentos transmitidos durante a fase teórica do mestrado.

Ao Professor Luiz Fernando (UFMG) pelas orientações técnicas desse trabalho.

Ao João Baptista Romão (Belgo), meu grande mestre, amigo e co-orientador desse trabalho.

Ao coordenador de processo Anísio Ferreira Torres. Grande colaborador, pela sua valiosa contribuição nas atividades envolvidas em todas as fases da execução dos experimentos.

Ao Eng^o Joaquim Costa, pelas valiosas contribuições nos direcionamentos conceituais na condução da dissertação.

Ao Eng. Eduardo Amaral, colega de sala, pelos incentivos e pela transferência de experiências como o mais recente mestre da GTEC - Aciaria.

Aos Srs. Hélio Clarete, José Geraldo da Silva, supervisores, monitores, operadores e forneiros da aciaria pela participação direta na execução dos experimentos.

Ao consultor Evander Caires Damasceno, pelo apoio nas análises estatísticas.

À Warley Barbosa, Carlos Sérgio Lima e Geraldo Leonardo (Belgo), Eng^o Simão Pedro, Luiz Fernando e Marco Luiz (Magnesita S/A), pelo apoio na área de laboratório químico.

Ao Eng^o Rodrigo Junqueira, Chefe de departamento do alto-forno, pelo apoio na fabricação do gusa líquido conforme especificações para os experimentos.

Aos Eng^o. Lucas Penna (Belgo), João Domingos (Acesita), Frederico e Guilherme (UFMG), colegas de mestrado, pelo companheirismo e apoio durante a fase teórica na UFMG.

Ao Srs. Sebastião Siqueira, José Geraldo e Vanuza da GRHQ / Treinamento, pelo apoio durante a fase teórica na UFMG.

Aos Eng^o Humberto Magalhães, Ângelo, Wilson, Felipe e Edílson pela ajuda na revisão dos cálculos termodinâmicos.

Aos estagiários Marlon Paolo, Talles e Marden, pelo apoio na área de informática.

À secretária Lídia pela ajuda na formatação do texto.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS.....	16
CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Principais características da Belgo-Usina de Monlevade.....	17
3.1.1 Principais características da aciaria LD.....	17
3.1.1.1 Convertedores.....	17
3.1.1.2 Estação de metalurgia secundária.....	17
3.1.1.3 Forno panela.....	18
3.1.1.4 Máquina de lingotamento contínuo.....	18
3.1.1.5 Laminadores.....	18
3.2 Breve descrição do processo LD.....	19
3.3 Principais funções do silício no processo LD.....	21
3.3.1 Agente formador de escória.....	21
3.3.2 Fonte de energia.....	21
3.4 Formação de escória no processo LD.....	22
3.4.1 Oxidação dos elementos do banho.....	22
3.4.2 Evolução da composição química da escória.....	22
3.4.3 Dissolução da caL.....	23
3.4.3.1 Mecanismo de formação da escória.....	24
3.4.4 Principais funções da escória no processo LD.....	26
3.5 Mecanismos da desfosforação.....	27
3.5.1 Teor de MgO na escória.....	29
3.5.2 Minério de ferro.....	30
3.5.3 Temperatura.....	30
3.5.4 Teor de carbono no final de sopro.....	30
3.5.5 Controle dinâmico da altura da lança de oxigênio.....	30
3.5.6 Agitação do banho.....	31
3.6 Basicidade da escória.....	31
3.7 Abordagens sobre o volume total de escória no processo LD.....	32
3.7.1 Cálculo do volume de escória.....	32
3.7.2 Importância do volume de escória para o processo LD.....	33

3.8 Principais alternativas existentes para operação com gusa líquido contendo baixo teor de silício.....	35
3.9 Análise estatística para avaliação dos resultados.....	36
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA.....	38
4.1 Etapa teórica.....	38
4.1.1 Modelo para cálculo das adições.....	38
4.1.2 Balanço térmico.....	39
4.1.3 Procedimentos operacionais.....	40
4.1.4 Análise estatística.....	43
4.1.5 Análise de laboratório.....	45
4.2 Etapa experimental.....	45
4.2.1 Fase 1: Experimentos exploratórios.....	45
4.2.2 Fase 2: Confirmatória.....	46
4.3 Validação do processo.....	46
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1 Preparação da escória recirculada.....	47
5.2 Etapa teórica.....	48
5.2.1 Balanço térmico.....	48
5.2.2 Modelo para o cálculo das adições.....	49
5.3 Etapa experimental.....	49
5.3.1 Experimentos exploratórios.....	49
5.3.1.1 Ajustes do modelo de cálculos das adições.....	49
5.3.1.2 Adequação dos procedimentos operacionais.....	50
5.3.2 Experimentos confirmatórios.....	50
5.3.2.1 Peso e composição química da carga metálica utilizada.....	51
5.3.2.2 Consumo de fundentes.....	52
5.3.2.3 Composição química da cal calcítica e dolomítica utilizada.....	53
5.3.2.4 Temperatura do banho.....	53
5.3.2.5 Aspecto físico da escória.....	54
5.3.2.6 Massa e percentual da escória líquida.....	57
5.3.2.7 Composição química da escória.....	58
5.3.2.8 Temperatura de líquidos da escória.....	63
5.3.2.9 Composição química do banho.....	65
5.3.2.10 Análise estatística dos resultados.....	67
5.4 Validação do processo.....	69

5.4.1 Carga metálica.....	69
5.4.2 Volume de escória.....	70
5.4.3 Análise dos resultados de fim de sopro.....	72
5.4.3.1 Consumo de fundentes.....	72
5.4.3.2 Teor de fósforo fim de sopro.....	74
5.4.3.3 Tempo de sopro.....	75
5.4.3.4 Composição química da escória fim de sopro.....	76
5.4.4 Análise estatística dos resultados.....	77
5.4.5 Ganhos potenciais.....	78
5.4.5.1 Ganhos indiretos.....	79
5.4.5.2 Ganhos diretos.....	79
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....	81
CAPÍTULO 7 TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Fig.1.1 Evolução do teor de silício do gusa líquido nos anos 2002 e 2004, na Belgo usina de Monlevade.....	15
Fig.3.1 Fluxograma macro da Belgo, usina de Monlevade.....	18
Fig.3.2 Visão esquemática do processo LD.....	20
Fig.3.3 Evolução da composição da escória durante o refino.....	23
Fig.3.4 Mecanismos da dissolução da cal no diagrama ternário (CaO-FeO-SiO ₂).....	25
Fig.3.5 Mecanismos da dissolução da cal.....	26
Fig.3.6 Partição do fósforo x temp. do aço líquido, basicidade e ferro total na escória	28
Fig.3.7 Diagrama ternário (CaO-FeO-SiO ₂)=80% com as regiões "A" e "B" de maior partição do fósforo.	29
Fig.3.8 Volume de escória x teor de silício no gusa líquido.....	33
Fig.3.9 Correlação do vol. de escória com o teor de fósforo no final de sopro.....	34
Fig.3.10 Incidência de cascão na lança de oxigênio em função do teor de silício no gusa líquido.....	35
Fig.4.1 Modelo para cálculo das adições de fundentes.....	39
Fig.4.2 Dispositivo para realização das amostragens sem basculamento do convertedor.....	40
Fig. 4.3 Padrão de sopro desenvolvido para os experimentos.....	43
Fig. 5.1 Transporte da escória para a peneira.....	47
Fig. 5.2 Peneiramento.....	47
Fig. 5.3. Escória pronta para o consumo.....	47
Fig. 5.4 Detalhes da granulometria da escória.....	47
Fig. 5.5 Modelo para cálculo das adições.....	49
Fig. 5.6 Evolução da temperatura do banho metálico.....	54
Fig. 5.7 Foto do banho aos 2 min de sopro (condição "A").....	55
Fig. 5.8 Foto do banho aos 2 min de sopro (condição "B").....	55
Fig. 5.9 Foto do banho aos 4 min de sopro (condição "A").....	55
Fig. 5.10 Foto do banho aos 4 min de sopro (condição "B").....	56
Fig. 5.11 Foto do banho aos 6 min de sopro (condição "A").....	56
Fig. 5.12 Foto do banho aos 6 min de sopro (condição "B").....	56
Fig. 5.13 Massa de escória líquida.....	57

Fig. 5.14 Percentual de cal fundida.....	57
Fig. 5.15 Teor de CaO na escória.....	60
Fig. 5.16 Teor de FeO na escória.....	60
Fig. 5.17 Teor de sílica na escória.....	61
Fig. 5.18 Teor de MnO na escória.....	61
Fig. 5.19 Teor de P ₂ O ₅ na escória.....	61
Fig. 5.20 Teor de de Al ₂ O ₃ na escória.....	62
Fig. 5.21 Teor de MgO na escória.....	62
Fig. 5.22 Teor de CaO livre na escória.....	62
Fig. 5.23 Ternário CaO.FeO.SiO ₂ da escória aos 2 min.....	63
Fig. 5.24 Ternário CaO.FeO.SiO ₂ da escória aos 4 min.....	64
Fig. 5.25 Ternário CaO.FeO.SiO ₂ da escória aos 6 min.....	64
Fig. 5.26 Teor de enxofre no banho.....	66
Fig. 5.27 Teor de fósforo no banho.....	66
Fig. 5.28 Teor de carbono no banho.....	66
Fig. 5.29 Teor de silício no banho.....	67
Fig. 5.30 Massa de escória gerada.....	70
Fig. 5.31 Consumo de cal.....	71
Fig. 5.32 Partição do fósforo.....	75
Fig. 5.33 Teor de fósforo fim de sopro.....	75
Fig. 5.34 Tempo de sopro.....	76
Fig. 5.35 Composição química da escória fim de sopro.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1 Composição química do gusa líquido.....	13
Tabela V.1 Composição química média da escória recirculada (% em peso).....	48
Tabela V.2 Calor de aquecimento dos materiais adicionados.....	48
Tabela V.3 Composição química e peso da carga metálica par a condição “A”.....	51
Tabela V.4 Composição química e peso da carga metálica para a condição “B”.....	52
Tabela V.5 Consumo de fundentes das corridas elaboradas na condição “A”.....	52
Tabela V.6 Consumo de fundentes das corridas elaboradas na condição “B”.....	53
Tabela V.7 Composição química das cales utilizadas em ambas as condições.....	53
Tabela V.8 Composição química da escória na condição “A”.....	58
Tabela V.9 Composição química da escória na condição “B”.....	59
Tabela V.10 Análise estatística com o teste “t”.....	68
Tabela V.11 Análise estatística teste Mann-Whitney.....	68
Tabela V.12 Composição química e peso da carga metálica na condição “A”.....	68
Tabela V.13 Composição química e peso da carta metálica na condição “B”.....	68
Tabela V.14 Composição química da escória fim de sopro.....	69
Tabela V.15 Balanço de massa para cálculo do volume de escória.....	70
Tabela V.16 Consumo de fundentes das corridas da condição “A”.....	72
Tabela V.17 Consumo de fundentes das corridas da condição “B”.....	72
Tabela V.18 Balanço do fósforo.....	73
Tabela V.19 Resultado do teste de “t”.....	76
Tabela V.20 Resultado do teste Mann Whitney.....	77
Tabela V.21 Ganhos diretos com redução do consumo de fundentes na aciaria.....	80

RESUMO

A quantidade de escória necessária para o refino do aço no processo LD é considerada uma das variáveis importantes, exercendo influência direta para o sucesso do refino primário do aço líquido. Embora a quantidade de escória, possa variar um pouco entre as aciarias, um valor considerado razoável está entre 70 e 80 kg de escória por tonelada de aço líquido.

A principal variável que contribui de maneira significativa para a determinação da quantidade de escória, é a massa de silício na carga. Esse trabalho teve como principal proposição, avaliar a viabilidade da utilização de escória recirculada da própria aciaria LD, visando a substituição de parte dos fundentes adicionados quando se utiliza gusa líquido com baixo teor de silício, considerando as condições operacionais da aciaria da Belgo-Usina de Monlevade.

Foi elaborado um planejamento de experimento envolvendo três etapas, onde foram fabricadas algumas corridas com e sem utilização de escória recirculada. Foram coletadas amostras do banho e da escória no primeiro período de sopro para avaliação dos resultados, tendo como foco a formação de escória. Na última etapa foi elaborada também uma seqüência de corridas para comparar os efeitos do novo procedimento com o procedimento de rotina adotado pela aciaria da Belgo-Usina de Monlevade.

Os resultados preliminares mostraram ser viável a utilização desta prática em termos operacionais e financeiros. Os ganhos ambientais também podem ser considerados significativos, uma vez que a utilização da escória recirculada, reduz a quantidade de resíduos descartáveis gerados pelo processo.

ABSTRAT

One of the most important variables to the success of steel primary refining is slag volume. Although the volume applied by the steelmakers do not vary so much, a reasonable range to be considered range is 70 until 80kg of slag per ton of liquid steel

Silicon input on the total charge of BOF influences strongly the slag volume because the refining process must follow the determined binary basicity ($\%CaO/\%SiO_2$) to reach the end blow target.

A Work plan was made in three stages: Firstly it was elaborated one model for calculations flux additions. In the second phase some heats with and without recycled slag were produced. Samples of steel and slag in different blow times were collected. In the last phase some heats were produced to compare with Belgo's row time product.

The main objective of this paper is to evaluate the utilization of recycled slag (from primary refining) focused on BOF operational parameters. Recycled slag was used to complement slag volume and to help in slag formation when using low silicon hot metal.

Preliminary results have shown a great possibility of recycled slag utilization during primary refining as well a cost reduction. Environment gains could be considered once the recycling

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de aço pelo processo BOF (basic oxygen furnace), é responsável atualmente por aproximadamente 60% da produção mundial de aço conforme dados do IBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2004). Esse processo tem como característica principal a sua carga metálica que é composta em seu maior percentual de gusa líquido (em torno de 80%) e o restante de sucata. A composição química do gusa líquido varia um pouco entre as usinas. A composição química média normalmente praticada pelas siderúrgicas é mostrada na tabela I.1

Tabela I.1- Composição química do gusa líquido

Elementos	(%)
Carbono	4,0 a 4,4
Silício	0,20 a 0,60
Manganês	0,30 a 0,60
Fósforo	0,080 a 0,120
Enxofre	0,010 a 0,030

Durante o processo praticamente todo o silício é oxidado formando sílica (SiO_2). Para evitar o desgaste do revestimento refratário do forno, toda essa sílica é neutralizada com a adição de cal. A quantidade da cal é dosada de maneira a manter uma relação ideal CaO/SiO_2 na escória, e também para conseguir a remoção do fósforo do gusa líquido. Da formação da sílica, e também de outros óxidos formados e/ou adicionados durante o processo, tem-se um certo volume de escória que possui funções importantes para o processo. Uma delas é minimizar as projeções de metal líquido provocada pelo impacto do jato de oxigênio no banho. Essas projeções, se não controladas, provocam aderência de metal na borda do forno e na lança de oxigênio, que normalmente trazem transtornos para a operação da aciaria.

Outra variável que também está diretamente ligada com o teor de silício do gusa é o aporte térmico para o sistema. A oxidação do silício promove uma reação exotérmica, e representa uma boa parte da energia necessária para o sistema. Como podemos observar o teor de silício constitui uma variável importante para o processo BOF como um todo. Por outro lado é sabido também que, à medida que se reduz o teor de silício do gusa líquido, tem-se uma sensível redução no consumo de combustível no alto-

forno, que por sua vez, contribui de maneira significativa para a redução do custo de fabricação do gusa líquido. Como o gusa líquido representa o principal item na planilha de custo de uma usina integrada, a redução do seu custo pode representar ganhos para toda a cadeia produtiva.

No caso da Belgo - Usina de Monlevade, operava-se com teor de silício médio no gusa líquido em torno de 0,45%. Com a entrada do novo alto-forno em dezembro de 2000, esforços vem sendo direcionados para se trabalhar com teor de silício mais baixo.

Conforme práticas existentes, a operação da aciaria utilizando gusa líquido contendo baixo teor de silício, implica em alguns procedimentos especiais, sendo o mais comum à utilização de fluidificantes, que têm a função de acelerar a formação da escória no início do processo. Um dos fluidificantes comumente utilizado é a fluorita (CaF_2). Porém, a utilização de fluorita em níveis elevados traz alguns efeitos negativos. Além do consumo, que representa um aumento do custo direto, a fluorita reduz a vida do revestimento refratário do forno.

Mesmo adotando esses procedimentos alternativos, os resultados nem sempre são os esperados. No caso da Belgo-Usina de Monlevade, a operação com gusa líquido contendo teor de silício mais baixo, além dos efeitos já mencionados acima, ocasionou uma maior incidência de agarramento de metal (cascão) na borda do convertedor e também na lança de oxigênio. A formação desse cascão traz uma série de transtornos para a operação da aciaria. Além do aumento de custo, pela necessidade de uma maior intervenção de manutenção na lança oxigênio, a aderência de cascão na borda do forno implica em paradas da aciaria para a sua limpeza, provocando perdas de produção.

Através de um trabalho realizado no ano de 2002 em conjunto entre as equipes do alto-forno e aciaria, conseguiu-se uma redução expressiva no teor de silício do gusa líquido. Além da redução do custo pela redução do consumo de fundentes na aciaria e de coque no alto-forno, observou-se também uma melhor performance operacional do alto-forno. Com esses trabalhos podemos dizer que a aciaria da Belgo-Usina de Monlevade, está preparada para operar com um gusa líquido contendo teor de silício em torno de 0,35%. Porém, conforme diretrizes colocadas pela administração da Belgo, os esforços nesse sentido deveriam continuar objetivando a capacitar a Usina

de Monlevade para operar com gusa líquido contendo teor de silício em torno de 0,250%. A figura 1.1 mostra a evolução do teor de silício do gusa líquido na Belgo-Usina de Monlevade, nos últimos quatro anos.

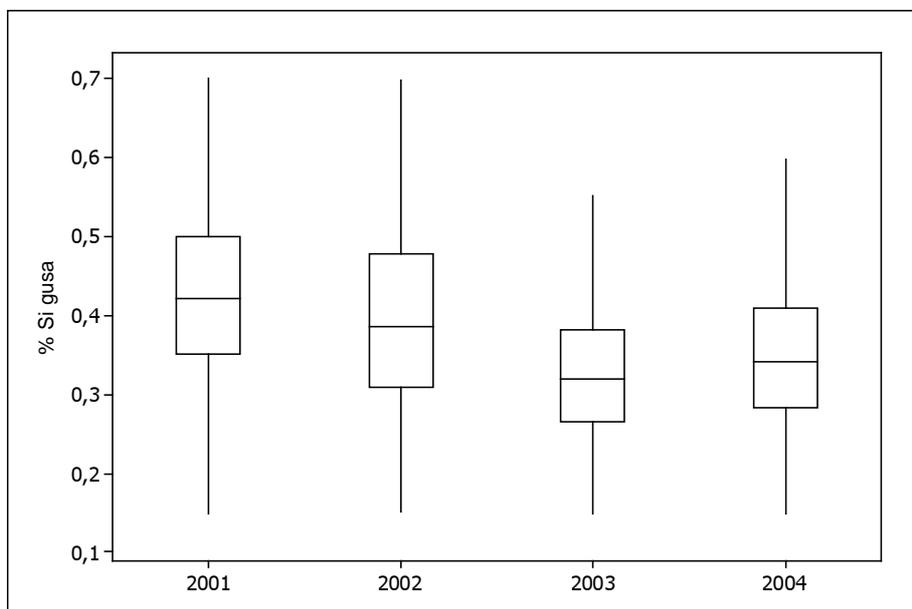


Figura 1.1- Evolução do teor de silício do gusa líquido utilizado na aciaria da Belgo-Usina de Monlevade (relatório interno Belgo, 2005)

A adequação das práticas operacionais, objetivando a redução do silício até ao nível atual de 0,35% vem sendo feita, principalmente utilizando adição de fluidificantes de escória e de outros procedimentos. A adoção desses procedimentos considerando a meta de 0,25% colocada para o teor de silício do gusa líquido, não é operacionalmente viável para a aciaria da Belgo-Usina de Monlevade. Com base nas razões acima, decidiu-se então desenvolver um estudo mais aprofundado sobre o assunto.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Adequação do processo BOF da aciaria da Belgo-Usina de Monlevade, visando operar com gusa líquido contendo teor de silício em torno de 0,25%, visando ganho de produção e redução de custo.

2.1 Específicos

- Minimizar a ocorrência de cascão na lança de oxigênio e na borda do forno
- Redução da geração de resíduos descartáveis

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Principais características da Belgo - Usina de Monlevade.

A Belgo-Usina de Monlevade é uma usina integrada com capacidade de 1.200.000 t/ano de fio máquina. Tem um mix de produção bastante variado atendendo a diversos segmentos, sendo os principais: cordoalhas para pneus, automotivo, molas, parafusos em geral, eletrodo, lâ de aço e cabo de aço. Desse “mix”, o principal é a cordoalha para pneu que atualmente representa em torno de 35% do total do fio-máquina produzido, sendo 60% destinada à exportação.

O gusa líquido é fornecido por um único alto-forno com capacidade de 1.030.000t/ano e tem a seguinte composição química média: 4,2%C, 0,350%Si, 0,350%Mn, 0,100%P e 0,010%S.

3.1.1 Principais características da aciaria LD

3.1.1.1 Convertedores.

A aciaria conta com dois convertedores de 110t de capacidade que operam em regime “stand by”. Devido ao mix de aço para emprego nobre, o processo do LD tem como prática a obtenção de teores de fósforo < 100ppm para a maioria dos aços. Essa condição implica em alguns cuidados e práticas especiais que por sua vez conferem ao processo algumas características peculiares.

3.1.1.2 Estação de rinsagem.

São duas as estações, sendo uma para cada convertedor. São equipadas com injeção de gás inerte e máquina de injeção de ligas em fio. As panelas são equipadas com plug poroso.

3.1.1.3 Forno panela.

Todo o aço produzido segue o fluxo de produção convertedor , FP (forno panela), lingotamento contínuo. O FP está equipado com máquinas de injeção de fios e a agitação do banho é feita através de agitadores eletromagnéticos e rinsagem.

3.1.1.4 Máquina de lingotamento contínuo

A máquina de lingotamento contínuo é de tecnologia “Paul Wurth”. Tem 6 veios com seção de 155 mm quadrados, equipados com agitadores eletromagnéticos. Como toda a produção é absorvida apenas por uma máquina de lingotamento, também são necessários certos cuidados e práticas especiais para alcançar além da qualidade, uma estabilidade operacional que permita o fluxo normal de produção.

3.1.1.5 Laminadores.

Os tarugos do lingotamento contínuo são recebidos por dois laminadores que produzem fio máquina em bitolas que variam de 5,5 mm a 44mm. Os tarugos podem ser recebidos via fluxo direto (lingotamento/laminadores) ou por um segundo fluxo através de estoque. A figura 3.1 mostra um fluxograma da Belgo-Usina de Monlevade.

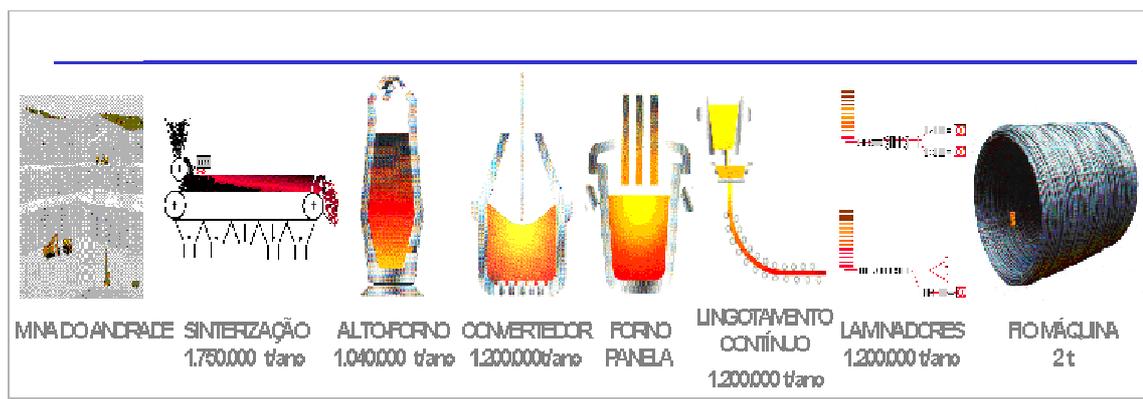


Figura 3.1 Fluxograma macro da Belgo-Usina de Monlevade.(documento interno da Belgo, 2004).

3.2 Breve descrição do processo BOF

Praticamente só restam dois processos pelos quais se pode obter o aço líquido: processo BOF (Basic Oxygen Furnace) e forno-elétrico. Um terceiro processo o EOF (Energy Optimizing Furnace) ainda é utilizado, mas é responsável por menos de 1% da produção mundial. O processo de fabricação de aço à oxigênio BOF, teve ao longo do seu desenvolvimento algumas alterações com relação projeto original. Um dos tipos com características mais similares ao projeto original é o LD. Essa denominação é oriunda das iniciais de duas cidades austríacas “Linz” e “Donawitz”, onde surgiram as primeiras experiências sobre esse processo, em 1949.

A grande diferença entre os dois processos está no tipo da carga metálica e da energia necessária para o processo. No processo via forno elétrico, a carga metálica é constituída praticamente por sucata. A fusão da carga se dá através da energia elétrica. Já no processo LD, o gusa líquido corresponde em torno de 80% da carga, o restante de sucata. Nesse caso, a energia necessária para o sistema vem do calor de aquecimento do gusa líquido e das reações exotérmicas.

A carga metálica é carregada no LD, juntamente com os fundentes (cal calcítica, cal dolomítica, minério de ferro, fluorita, etc.). Após o carregamento do forno é feita a injeção de oxigênio à alta pressão e velocidade supersônica através de uma lança refrigerada a água. Ocorrem então várias reações químicas entre o oxigênio e os elementos químicos contidos na carga metálica. A maioria dessas reações são exotérmica, liberando parte da energia necessária para o sistema.

A taxa de penetração do jato de oxigênio no banho metálico é uma variável muito importante para o processo. É conhecida como relação “L/Lo”, onde “L” é a penetração do jato no banho, e “Lo”, a altura inicial do banho metálico. A relação “L/Lo” está diretamente ligada ao projeto da lança, pressão e vazão do oxigênio, altura de trabalho da lança com relação ao banho metálico e uma constante “k”. Essa constante depende do ângulo dos furos da lança por onde sai o oxigênio. O tempo de processo, o grau de oxidação do banho e a formação da escória, são variáveis que estão diretamente ligadas com a relação “L/Lo”.

Os fundentes têm como objetivos principais, o fechamento do balanço térmico e também a formação da escória que, como veremos posteriormente, é uma variável importante para o processo. Em resumo, o objetivo do processo LD é o refino primário do gusa líquido. A figura 3.2 abaixo mostra uma visão esquemática de um forno LD.

Obs.: O perfil do convertedor pode variar um pouco de acordo com o projeto de cada aciaria.

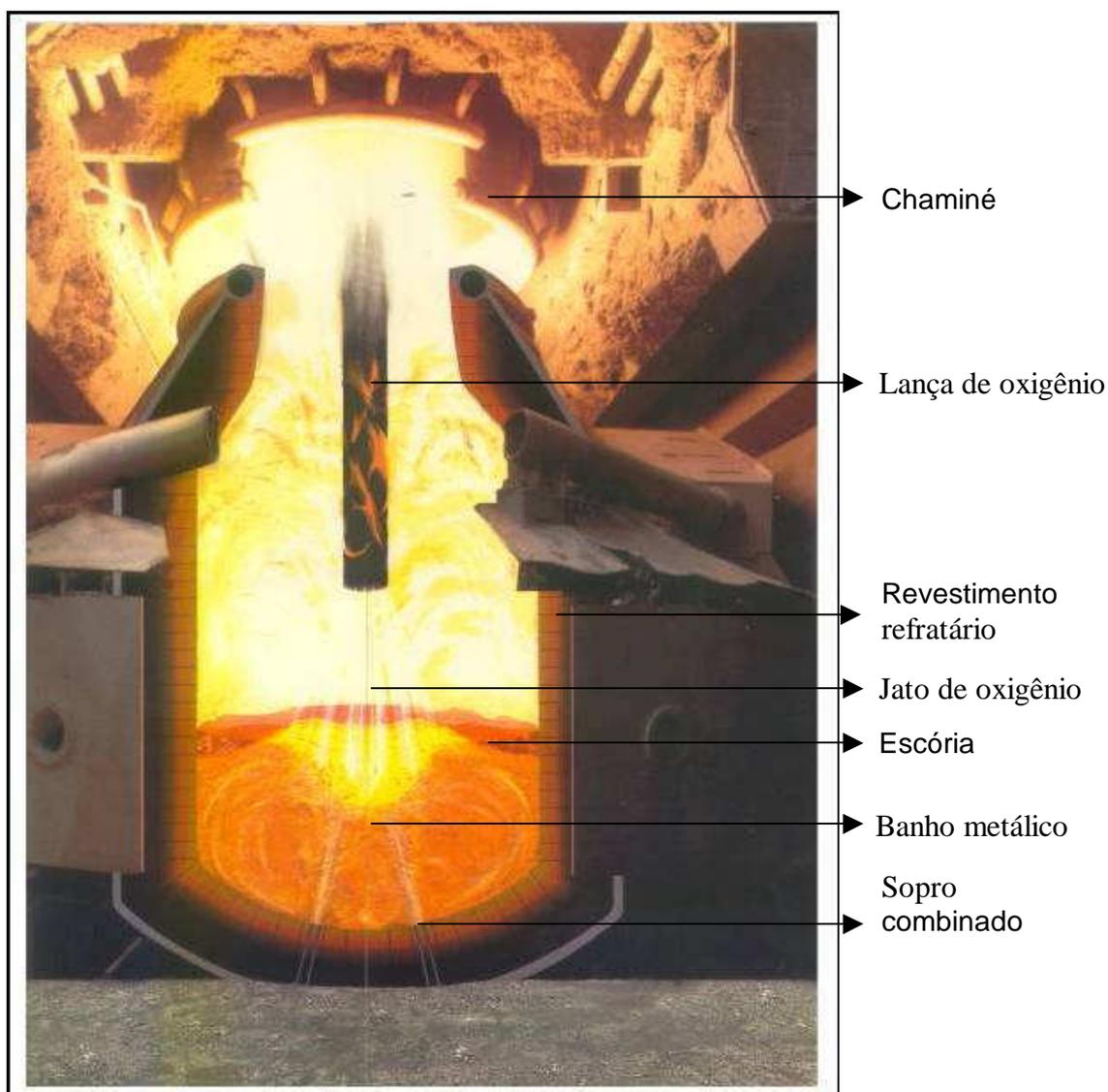


Figura 3.2 - Visão esquemática do convertedor LD (curso interno, Belgo,2002)

3.3 Principais funções do silício no processo LD.

3.3.1 Agente formador de escória.

O silício é um dos primeiros elementos a ser oxidado juntamente com o ferro, formando o composto $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, chamado faialita. Esse composto tem um ponto de fusão relativamente baixo que representa uma variável importante para a formação da escória no início do processo. Quando o silício se encontra em baixa concentração no gusa líquido, as condições de oxidação são alteradas e pode comprometer a dissolução da cal e, conseqüentemente a formação da escória será prejudicada.

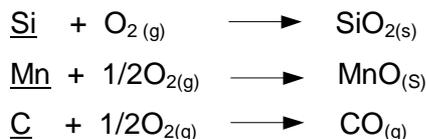
3.3.2 Fonte de energia

A energia necessária ao processo vem do calor de aquecimento do gusa líquido e das reações exotérmicas entre os elementos da carga metálica e o oxigênio injetado. Para se conseguir a temperatura ideal no final do sopro, é feito um balanço térmico, levando em consideração todas as entradas e saídas de energia do sistema como um todo. Nesse balanço, o silício é uma das principais fontes de energia. A sucata, além de fazer parte da carga metálica como fonte de ferro, é considerada também como material refrigerante para o fechamento do balanço térmico. Na grande maioria das aciarias, trabalha-se com um excesso de energia na carga. Esse excesso tem então de ser compensado com a adição complementar de outros materiais refrigerantes, sendo o mais utilizado o minério de ferro. Como a redução do teor de silício do gusa líquido tem impacto positivo na redução do custo operacional tanto na aciaria como no alto-forno, as usinas integradas vêm fazendo esforço no sentido de produzir gusa líquido com teor de silício mais baixo.

3.4 Formação da escória no processo LD

3.4.1 Oxidação dos elementos do banho

No processo LD, além do ferro que se encontra em maior percentual, o carbono, manganês e o silício, são os outros principais elementos constituintes da carga metálica. Com a injeção de oxigênio, já no início do sopro esses elementos são oxidados, sendo as principais reações:



A seqüência da prioridade da oxidação desses elementos no início de sopro pode ser observada pela pressão de oxigênio em equilíbrio, para a formação de cada um dos óxidos, considerando a composição química da carga metálica e a temperatura. A pressão de oxigênio de equilíbrio para cada reação, considerando as condições em que foram realizados os experimentos são mostradas pelas equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$\text{Oxidação do silício:} \quad P_{\text{O}_2} = 4,954 \times 10^{-11} \quad (3.1)$$

$$\text{Oxidação do carbono:} \quad P_{\text{O}_2} = 1,996 \times 10^{-11} \quad (3.2)$$

$$\text{Oxidação do manganês:} \quad P_{\text{O}_2} = 3,064 \times 10^{-11} \quad (3.3)$$

Observa-se que a velocidade e extensão da oxidação desses elementos serão função: do potencial de oxigênio disponível, da temperatura, dos teores desses elementos e também da escória já formada. Uma fase muito importante da formação da escória inicia-se com a incorporação de mais dois óxidos: CaO e MgO. As atividades da SiO₂, FeO e MnO são alteradas com essa incorporação. No caso da sílica, a sua atividade é reduzida, o que vem facilitar a oxidação de mais silício. Já o MnO e FeO têm suas atividades aumentadas favorecendo o seu retorno ao banho.

3.4.2 Evolução da composição química da escória.

Logo nos primeiros minutos após o início do processo, é formada uma escória ácida contendo FeO, SiO₂ e MnO. Após a introdução da cal, a mistura sólido + líquido pode ser representada pelo ponto “F” conforme é mostrado na figura 3.3. O ponto “I” representa a composição do líquido antes que toda cal se dissolva. Nesse momento a composição da escória pode ser alterada por dois fatores: a quantidade de cal dissolvida e o grau de oxidação do banho formando FeO. Desses dois fatores teremos a trajetória real da composição da escória durante o refino.

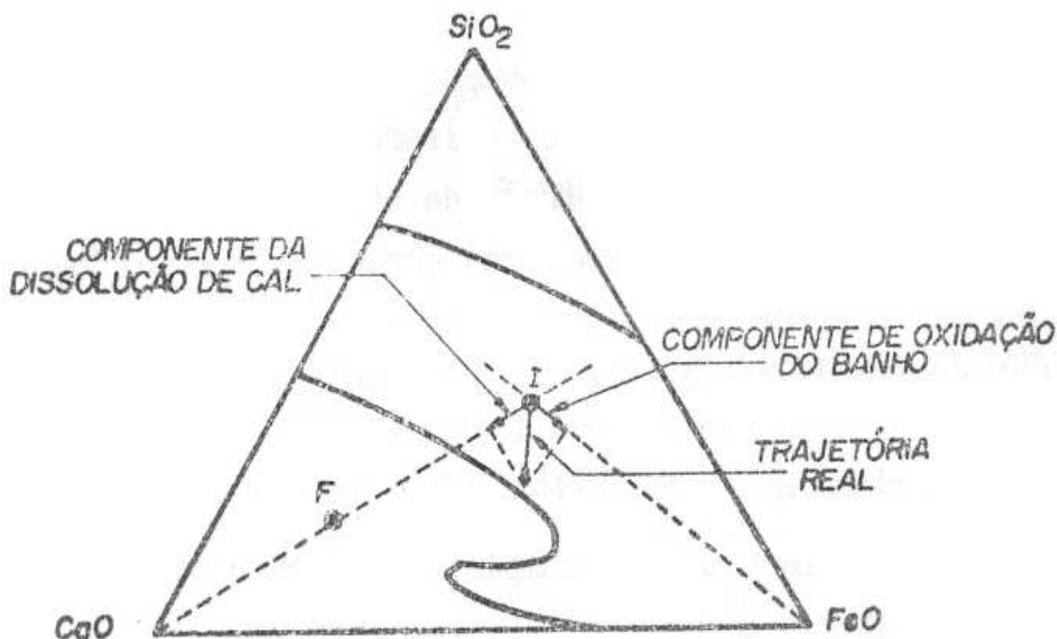


Figura 3.3 Evolução da composição da escória durante o refino(CAMPOS,1980)

3.4.3 Dissolução da cal

De acordo com (CAMPOS,1980), a escória tem um papel muito importante para o processo LD, e a cal é o componente essencial dessa escória. Sendo assim, objetiva-se que essa cal seja incorporada (dissolvida) o mais rapidamente possível de maneira a manter um nível de basicidade adequada ao processo. Como no processo LD, o tempo total de refino é relativamente curto, surge então por parte dos aciaristas a necessidade de manter atenção voltada para as variáveis que influenciam na dissolução da cal. As principais variáveis estão relacionadas abaixo:

- Atividade do CaO na escória
- Viscosidade da escória
- Temperatura da escória
- Superfície de contato sólido-líquido
- Agitação do banho
- Teor de FeO da escória.

A atividade do CaO não chega a ser uma restrição, por se manter baixa no início do processo. Já a viscosidade da escória constitui um fator importante, pois acima de 35% de CaO, que é um nível normal no processo, a viscosidade da escória aumenta

de maneira significativa. O FeO age no sentido de reduzir essa viscosidade, acelerando o processo de dissolução da cal. Com relação à temperatura, a mesma provoca o recozimento do grão da cal, aumentando o seu tamanho, e com isso dificulta a dissolução. Porém, por outro lado, o aumento da temperatura tem também um efeito altamente benéfico provocado pela redução da viscosidade da escória.

Uma maior superfície de contato sólido-líquido, acelera o processo de dissolução e pode ser alcançado com a utilização de uma cal de menor granulometria e mais porosa. Com relação à agitação do banho, uma maior agitação contribui nesse mesmo sentido, reduzindo a camada limite, expondo a cal à uma escória sempre renovada.

3.4.3.1 Mecanismo de formação da escória

A formação da escória está diretamente ligada à dissolução da cal. Conforme descreve CAMPOS(1980), a transferência de CaO para a fase líquida se dá após o período passivo. Esse período se inicia logo que um pedaço de cal frio é coberto pela escória líquida que irá formar em torno dele uma camada solidificada. A fusão dessa carapaça de escória solidificada demora um certo tempo que gira em torno de um minuto. A granulometria e a temperatura inicial da cal podem fazer esse tempo variar. Conforme menciona CAMPOS(1980), estudos realizados, retirando amostras desses pedaços de cal durante o processo de sopragem, mostraram que as amostras colhidas possuíam duas zonas: uma central contendo cristais de CaO e uma segunda formada por um contorno contendo alguns óxidos, principalmente óxidos de ferro e manganês. A concentração desses óxidos aumentavam em direção à periferia, formando soluções de FeOMnOCaO e compostos tais como ferrita, silicatos e fosfatos. Outra observação importante citada por esse estudo, é que a composição química dessa camada varia com a composição inicial da escória. Se a escória inicial é rica em SiO₂ e pobre em FeO, a camada é rica em ortossilicato de cálcio (2CaO SiO₂) com alto ponto de fusão (2130°C). Por outro lado, se a composição inicial da escória é rica em FeO, a trajetória da dissolução da cal no diagrama ternário (FeO-SiO₂-CaO), não atinge a zona de formação do ortossilicato de cálcio, conforme pode ser visto na figura 3.4 abaixo. Nesse caso, a formação da escória é beneficiada, sendo essa a condição desejada. Experimentos realizados comprovaram que, quanto maior for o teor de FeO na,

escória, melhor será a dissolução da cal. A figura 3.5 mostra os dois tipos de dissolução da cal. O caso "A", contendo a presença do ortosilicato, e o caso "B" onde a escória inicial contém alto teor de FeO e ocorre a formação da camada impregnada.

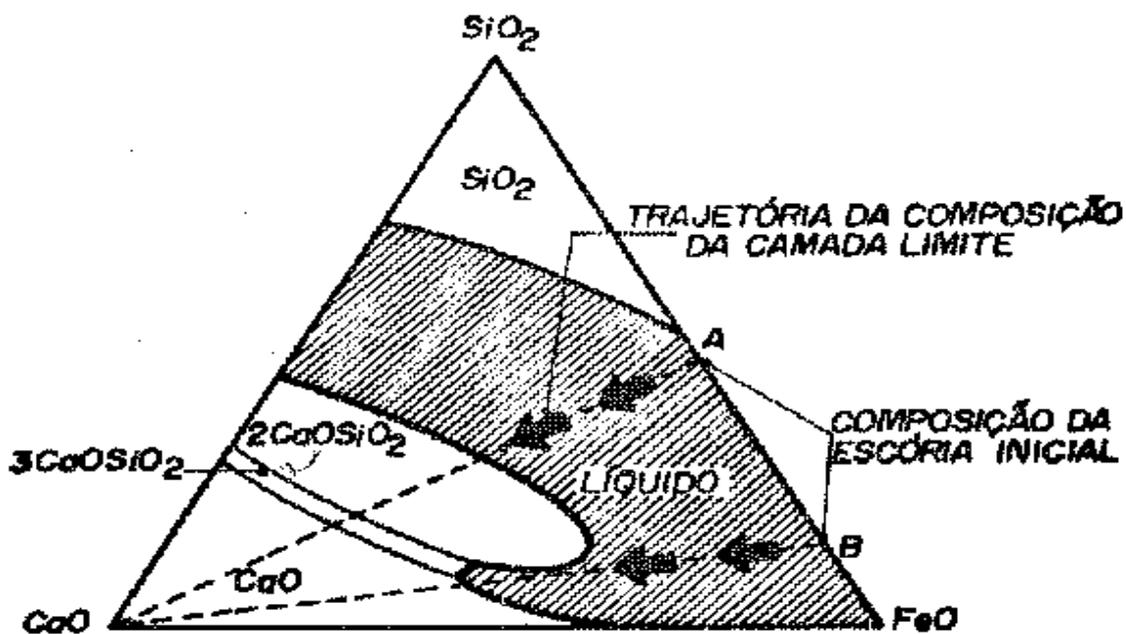


Figura 3.4 Esquema dos dois mecanismos de dissolução da cal, no diagrama ternário, CaO-FeO-SiO₂ (CAMPOS, 1980).

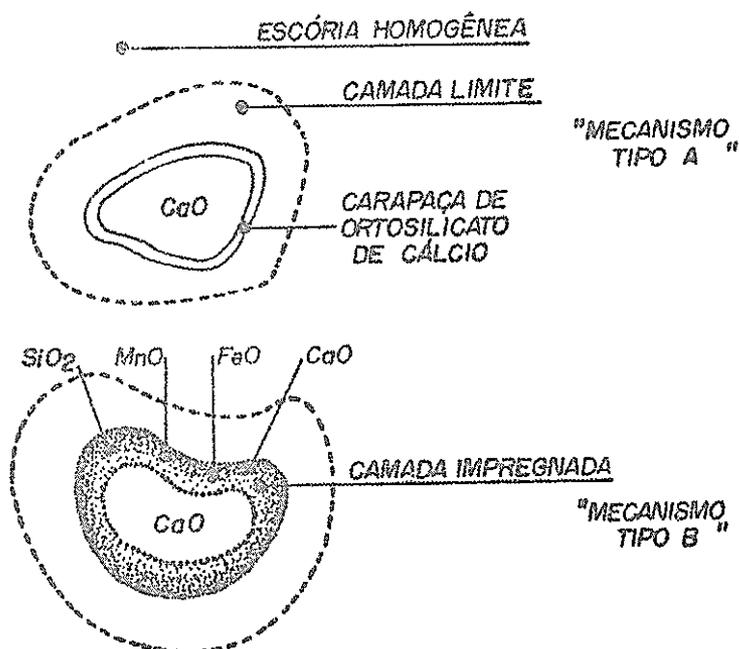


Figura 3.5: Mecanismos de dissolução da cal (CAMPOS,1980)

3.4.4 Principais funções da escória no processo BOF.

Para se atingir os objetivos esperados do refino pelo processo BOF, é necessário que a formação da escória comece logo no início da injeção de oxigênio. Como já mencionado anteriormente, a escória tem várias funções para o processo, dentre elas:

- Desfosforação do gusa líquido.
- Neutralização da sílica formada e conseqüentemente proteção do revestimento refratário contra desgaste prematuro.
- Formação de uma espécie de "colchão" para minimizar as projeções de metal para fora do forno e também a aderência desse metal na parte superior do forno e/ou na própria lança de oxigênio.

Como já descrito anteriormente no item 3.4.1, o primeiro elemento a ser oxidado é o silício juntamente com o ferro formando um composto $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ chamado faialita. Esse composto possui ponto de fusão em torno de 1200°C . Nesse primeiro período de sopro, praticamente todo silício é oxidado. O mesmo ocorre com parte do manganês

formando MnO. A formação desses óxidos irá provocar a dissolução da cal formando a escória.

Como já vimos, a escória é uma variável importante para o processo BOF como um todo. Da sua formação em um grau maior ou menor, irá depender o sucesso ou não do processo de refino do gusa, principalmente com relação à taxa de desfosforação. Também é através de uma boa formação da escória no momento certo, é que se consegue minimizar o nível de projeções de metal para fora do forno e conseqüentemente sem aderência de metal na lança de oxigênio e na parte superior do forno. Como podemos observar, o sucesso do processo de fabricação do aço líquido no convertedor LD, depende fundamentalmente de uma boa formação de escória.

3.5 – Mecanismo da desfosforação

O gusa líquido possui em torno de 0,100% de fósforo. A maioria das especificações dos aços requer teor de fósforo final menor que 0,010%. Isso significa que a desfosforação é considerada uma das fases importantes do processo do refino do gusa líquido. Por conseqüência, em qualquer estudo que envolva esse processo, deve-se levar em consideração esses aspectos.

O processo de desfosforação se dá pela formação do tetra-cálcio-fosfato e do tri-cálcio-fosfato. De acordo com CHUYKO (1976) E WARD (1962), com base na constante “K” de equilíbrio, a reação mais provável é a do tri-cálcio-fosfato e ocorre conforme a seguinte reação:



A partição do fósforo na escória é dada pela seguinte equação:

$$P = \frac{(P)}{[P]} \quad \text{onde } (P) = \% \text{ de P na escória e } [P] = \% \text{ de P no aço} \quad (3.4)$$

Existem algumas variáveis que podem influenciam o mecanismo da desfosforação. Conforme mostrado por HEALY (1970), a partição do fósforo está intimamente ligada à

temperatura do aço líquido, relação CaO/SiO_2 e ao teor de ferro total da escória. Segundo o autor, essa relação pode ser representada pela seguinte equação:

$$\text{Log} \frac{(P)}{[P]} = \frac{22350}{T} - 16 + 2,5 \log Fe + 0,08 \text{CaO}, \text{ onde:} \quad (3.5)$$

- (P) = teor de fósforo na escória (%)
- [P] = teor de fósforo no aço (%)
- Fe = teor de ferro total na escória (%)
- CaO = teor de CaO na escória (%)
- T = temperatura do metal em (K)

As figura 3.6 e 3.7 mostram o teor de fósforo no aço em função da temperatura do aço, da basicidade binária (CaO/SiO_2) e do teor do ferro total da escória.

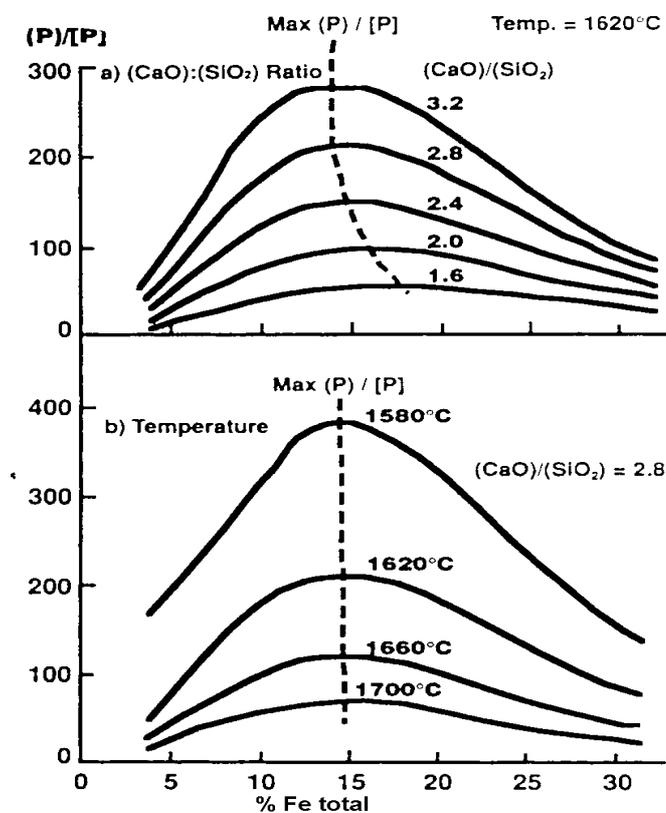


Figura 3.6 - Partição do fósforo em função da temperatura do aço, basicidade e ferro total na escória, (THORNTON e ANDERSON,1994).

Outro estudo, realizado por BARDENHEUR e OBSERHAUSER(1969), identifica no diagrama ternário (CaO-FeO-SiO₂) para temperatura de 1620°C, duas regiões onde se tem desfosforação máxima, conforme mostra a figura 3.7.

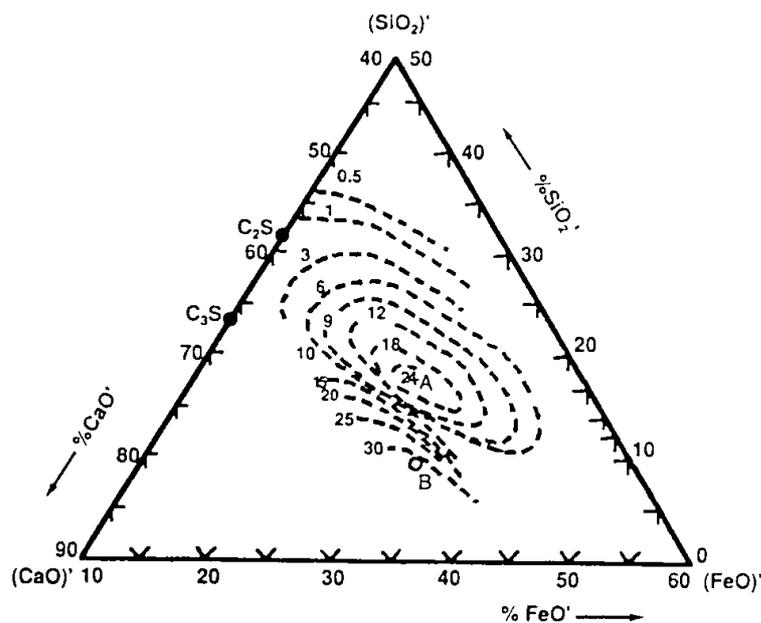


Figura 3.7 - Diagrama ternário (CaO-FeO-SiO₂) com as regiões "A" e "B" de maior partição do fósforo(THORNTON e ANDERSON,1994).

Outras variáveis envolvidas no processo BOF também podem influenciar na taxa de desfosforação. Algumas dessas variáveis foram avaliadas na usina de Llanwern da "British Steel", por THORNTON e ANDERSON(1994), e mostraram os seguintes resultados:

3.5.1 Teor de MgO na escória

O teor de MgO entre 6 e 10% normalmente é objetivado pela maioria das aciarias para que se tenha uma melhor performance da vida do revestimento do convertedor. Nos testes feitos na Usina de Llanwern, 10,5 kg/t de cal dolomítica foram substituídos por 10,5 kg/t de cal calcítica. O teor de MgO na escória reduziu em 3% e houve uma redução de 0,004% no teor de fósforo no final de sopro.

3.5.2 Minério de ferro:

O minério de ferro é adicionado no forno com o objetivo de fechar o balanço térmico. Ele contribui também para uma maior oxidação do banho metálico e conseqüentemente favorece a desfosforação. Os testes mostraram que nas corridas que necessitaram da adição de minério de ferro, foi conseguido um teor de fósforo 0,005% menor quando comparado com as corridas sem adição. Outros testes foram feitos para grandes adições de minério de ferro e não se observou uma redução linear.

3.5.3 Temperatura

Temperatura mais baixa favorece a desfosforação. Houve uma redução de 10 ppm no teor de fósforo quando a temperatura foi reduzida em 10°C.

3.5.4 Teor de carbono no final de sopro

O teor de carbono visado no final de sopro tem relação direta com o grau de oxidação do banho metálico. Por conseqüência essa maior oxidação do banho, implica em um teor maior de FeO na escória. Essa condição reduz o ponto de fusão da escória, mantendo a cal dissolvida, conferindo à escória as condições ideais para a desfosforação. Os testes mostraram que, reduzindo o valor do teor de carbono de 0,07 para 0,03%, o teor de fósforo reduz em 0,004%.

3.5.5 Controle dinâmico da altura da lança de oxigênio

A altura de trabalho da lança de oxigênio com relação ao banho metálico influencia diretamente na taxa de penetração do jato de oxigênio e também na área atingida por ele. Esses parâmetros alteram o grau de oxidação da escória, que por sua vez tem influência direta no processo de desfosforação conforme já citado anteriormente. O controle pode ser feito manualmente utilizando-se da experiência do operador ou automaticamente através do sopro dinâmico. Observou-se que, quando esse controle é feito automaticamente, há uma redução no teor de fósforo de 0,004% comparado com o controle manual.

3.5.6 Agitação do banho

A maioria dos convertedores atualmente são equipados com sopro combinado pelo fundo por onde é injetado gás inerte. O sopro combinado atua favorecendo a cinética das reações e contribui para uma maior interação do banho metálico com o oxigênio injetado. Também no caso da desfosforação os testes na usina de Llanwern confirmaram essa melhoria. No final do processo LD, normalmente é retirada uma amostra do aço líquido para análise química. A agitação foi feita durante o tempo de espera da análise química e promoveu uma redução do teor de fósforo de 0,004%.

3.6 Basicidade da escória

Conforme já mencionado anteriormente, praticamente todo o silício do gusa líquido é oxidado no primeiro período de sopro formando SiO_2 . Somado às outras fontes de sílica que são adicionadas via fundentes, tem-se então um volume de SiO_2 final, que precisa ser neutralizado com um óxido básico, no caso o CaO . No processo LD, temos a presença de outros óxidos, como é o caso do MgO que vem da cal calcítica, cal dolomítica e também do desgaste do revestimento refratário. A alumina (Al_2O_3), em vem de residuais de alguns fundentes e também da escória do gusa líquido que normalmente é enforada, embora em pequena quantidade. Apesar desses outros óxidos, normalmente se trabalha na aciaria com o conceito de basicidade binária que é dada pela fórmula:

$$\text{Basicidade} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \quad (3.6)$$

Além da desfosforação, a basicidade da escória pode influenciar também na vida do revestimento refratário do convertedor. Juntamente com o MgO , outros óxidos e a temperatura, a basicidade influencia na saturação da escória em MgO . Esse índice de saturação é normalmente utilizado como característica de uma escória que poderá ser mais ou menos agressiva ao revestimento refratário. Dessa forma tem-se então os principais fatores que irão determinar o valor ideal da basicidade que se deve operar. Na prática pode-se considerar uma faixa de 2,5 a 3,5 os valores adotados pela maioria das aciarias.

3.7 Abordagens sobre o volume total de escória na aciaria LD.

Sobre o volume total de escória no processo LD, entende-se como a somatória dos volumes dos diversos óxidos que compõem a escória. A origem da composição final de uma escória de aciaria pode ser assim resumida:

- CaO: proveniente da cal calcítica e cal dolomítica enforçadas;
- MgO: vem da cal dolomítica enforçada e do desgaste normal do revestimento refratário do forno;
- SiO₂: formada pela oxidação do silício da carga metálica e residuais dos fundentes enforçados;
- Al₂O₃: proveniente de residuais dos fundentes e da escória do alto-forno;
- MnO: pela oxidação do manganês da carga e residuais de materiais adicionados;
- P₂O₅: pela oxidação do fósforo da carga e residuais de materiais adicionados
- FeO: pela oxidação do ferro da carga metálica;

3.7.1 Cálculo do volume de escória

Sobre o volume ideal, a bibliografia menciona alguns valores que podem variar conforme parâmetros e práticas operacionais que são peculiares à cada aciaria. Na prática, o valor de 70 a 80 kg de escória por tonelada de aço líquido são os valores normalmente praticados pelas aciarias.

Dois fatores são preponderantes na determinação do volume de escória. Em primeiro lugar depende da taxa de desfosforação que se pretende obter. Outro fator também importante, é a necessidade de se ter um volume mínimo de escória necessário para minimizar as projeções do metal durante o processo de refino. Essas projeções além de provocarem uma perda metálica significativa, provocam também aderência de metal na borda do forno e também na lança de oxigênio, trazendo grandes transtornos para a parte operacional da aciaria.

A sílica formada pela oxidação do silício, somada às outras fontes de sílica do processo irá determinar o teor final de sílica na escória. Utilizando-se da equação do cálculo da basicidade, calcula-se a massa de CaO que deverá satisfazer os parâmetros operacionais citados anteriormente. Assim pode-se concluir que, o teor de

silício no gusa líquido constitui o ponto de partida para obter a massa de escória. De posse dessa massa faz-se então uma análise se a mesma irá ou não atender os parâmetros operacionais, de maneira a obter as condições de refino objetivadas. A figura 3.8 mostra a relação da massa de escória em função do teor de silício no gusa líquido na usina de Teesside Works da British Steel.

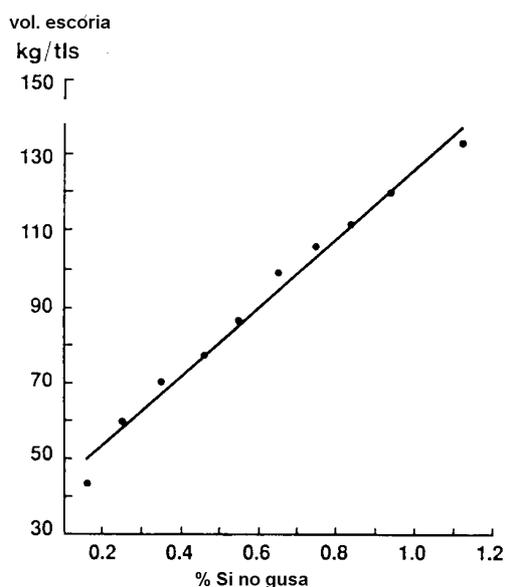


Figura 3.8 - Volume de escória em função do teor de silício no gusa líquido (THORNTON e ANDERSON,1994)

3.7.2 Importância do volume de escória para o processo

A taxa de desfosforação depende de algumas variáveis, dentre elas o volume de escória. Esse assunto foi abordado por THORNTON e ANDERSON (1994). Os autores descrevem sobre um trabalho realizado na usina de British Steel em 1992. Apesar de citar que o teor de fósforo menor que 100 ppm é atingido com valores de 150 kg de escória por tonelada de aço líquido, conforme é mostrado na figura 3.9, no mesmo artigo é citado valores de 95kg/t com desenvolvimento de práticas especiais de sopragem. A figura 3.9 mostra a relação entre o volume de escória e o teor de fósforo no fim de sopro na usina de Teesside Works da British Steel.

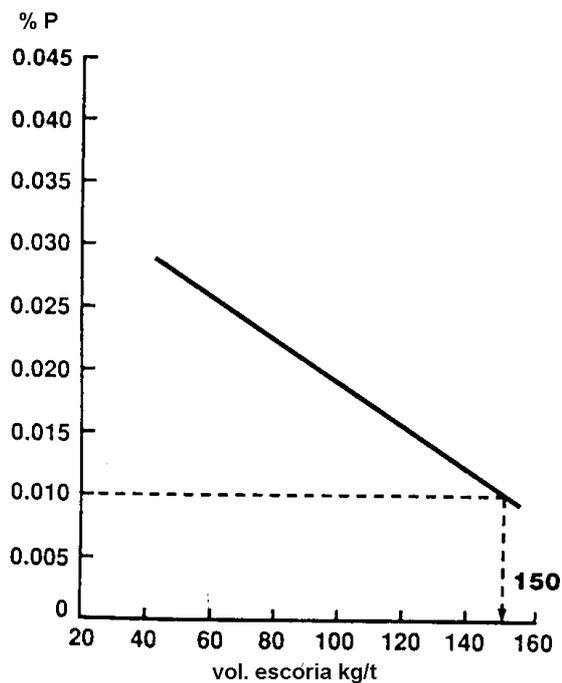


Figura 3.9 - Correlação do volume de escória com o teor de fósforo no final de sopro, THORNTON e ANDERSON, (1994).

Como já foi enfatizado, uma segunda função importante do volume de escória é a sua forte correlação com a aderência de metal na lança de oxigênio. O monitoramento desse item normalmente faz parte do controle da rotina diária dos aciaristas e é acompanhado de maneira sistemática. A figura 3.10 mostra a evolução da incidência de lanças de oxigênio com cascão em função do teor de silício do gusa líquido, na aciaria da Belgo-Usina de Monlevade.

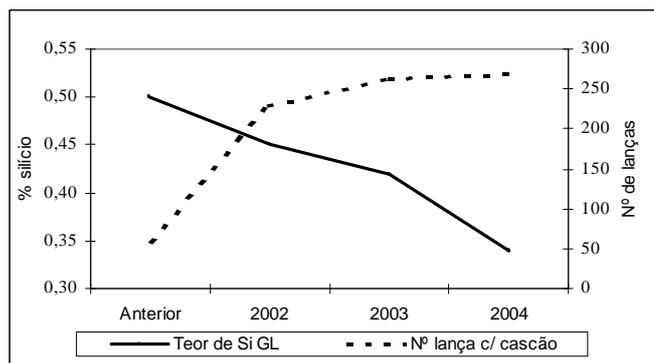


Figura 3.10 - Ocorrência de cascão na lança em função do teor de silício do gusa líquido (relatório interno da Belgo, 2004).

3.8 Principais alternativas existentes para operação com gusa líquido de baixo teor de silício.

Existem algumas alternativas para minimizar os efeitos colaterais quando se opera com gusa líquido contendo baixo teor de silício. A mais utilizada, é a adição de fluidificantes de escória que reduz o ponto de fusão, acelerando a sua formação. A adequação do projeto da lança de oxigênio, e operar com uma taxa de penetração do jato de oxigênio mais baixa, ou seja, menor relação de L / L_0 , também são práticas conhecidas. Essas duas últimas permitem uma maior oxidação do banho, contribuindo da mesma forma, para acelerar o processo de formação de escória. Embora as alternativas citadas acima tragam bons resultados nesse sentido, existem efeitos negativos quando se utilizam dessas práticas. O uso de fluidificantes de escória, além do custo, provoca desgastes no revestimento refratário, contribuindo de para a redução da vida do revestimento do forno. Adotar práticas para operar com uma menor relação de L / L_0 , pode implicar num aumento do tempo de processo, que no caso da Belgo-Usina de Monlevade é incompatível com seu atual fluxo de produção.

Existem alguns trabalhos já publicados que relatam sobre alguns experimentos que vêm sendo realizados com sucesso utilizando técnicas para adequação do volume de escória. Um artigo publicado pela revista *Ironmaking and Steelmaking* (THORNTON e ANDERSON, 1994), aborda esse assunto, relatando um trabalho realizado nas usinas de Teesside Works e Llanwern da British Steel. Essas usinas operam com 3 convertedores de 250 t e fabricam placas e tiras. Devido à qualidade do produto final, visam teor de fósforo no final de sopro menor que 100 ppm. Em 1992 houve uma diretriz da administração da empresa para abaixar o teor de silício do gusa, visando

atender à um plano de redução de custo. Diante desse novo cenário foram desenvolvidas novas práticas visando adequação do volume de escória. Os experimentos foram realizados utilizando escória reciclada de alto-forno e também com utilização de silício-aluminato, contendo 75% de sílica e 17% de alumina.

Também na Siderar (Argentina), pelo mesmo motivo, foram realizados estudos nesse sentido (DONAYO, 1993). Na Siderar as experiências foram feitas utilizando escória reciclada da própria aciaria. Após o processo de fabricação do aço no LD, a escória é descartada normalmente conforme rotina da aciaria. É então, beneficiada para se obter uma granulometria adequada ao processo. Parte da cal destinada ao processo é então substituída por uma certa quantidade dessa escória beneficiada. Segundo DONAYO (1993), os primeiros resultados foram bastante satisfatórios. Os fundamentos teóricos dessa prática está na compensação do baixo volume de escória, em função do baixo teor de silício do gusa líquido, com adição de uma certa quantidade da escória reciclada. Devido ao menor ponto de fusão dessa escória adicionada pela presença do óxido de ferro, em torno de 25%, tem-se então uma certa quantidade de escória formada rapidamente logo no início do sopro. Com isso, essa escória estará pronta para cumprir uma das suas funções no processo que é evitar as projeções do metal líquido, principalmente no primeiro período do sopro.

4- Análise estatística para avaliação dos resultados

A análise de qualquer processo depende do nível de conhecimento que se tem sobre o mesmo. A coleta de dados e a transformação dos mesmos em informações tornam-se de fundamental importância para os resultados das análises.

A utilização de ferramentas estatísticas nas diversas áreas vem se tornando cada vez mais freqüente, não só no meio acadêmico, mas também nas indústrias, hospitais, bancos, etc. Uma dessas ferramentas largamente utilizada é o teste de hipótese. Ele auxilia na avaliação de diferenças entre processos, através de comparação de amostras distintas. Em princípio, recomenda-se usar testes estatísticos paramétricos ao invés de testes não-paramétricos, particularmente sob o argumento de que os testes paramétricos são mais poderosos sob o ponto de vista estatístico.

Para estabelecer conclusões mais confiáveis sobre uma possível diferença ou igualdade entre as amostras que estão sendo testadas, foi utilizado também um teste não-paramétrico. Testes desse tipo são apropriados para amostras pequenas e independem das suposições associadas ao teste “t de student”. “Métodos não-paramétricos usam soluções aproximadas para problemas exatos, enquanto que os métodos paramétricos usam soluções exatas para problemas aproximados” (CONOVER,1999).

Um método não-paramétrico comumente utilizado é o teste de Mann-Whitney, também conhecido como teste “U” de Mann-Whitney. Este teste é geralmente usado no lugar do teste “t” para duas amostras independentes quando as suposições para o teste “t” não são atendidas, podendo ser a suposição de normalidade e/ou a suposição de homogeneidade de variância (variância aproximadamente constante). De acordo com CONOVER (1999), comparações da eficiência relativa entre o teste de Mann-Whitney e o teste “t” para duas amostras independentes mostram que o teste de Mann-Whitney é um teste seguro para ser usado.

4 METODOLOGIA

A proposição desse trabalho foi o desenvolvimento de um plano e aplicação de testes com objetivo de avaliar a viabilidade da operação da aciaria LD, utilizando gusa líquido contendo um menor teor de silício.

Conforme pesquisas realizadas na etapa da revisão bibliográfica, foram avaliados trabalhos dentro desse mesmo foco já desenvolvidos em outras siderúrgicas. Através desses estudos verificou-se três possibilidades para realização dos testes:

1. Utilização de escória recirculada de alto-forno;
2. Utilização de uma escória à base de silicato de alumínio;
3. Utilização de escória recirculada da própria aciaria;

Após uma avaliação de cada uma das alternativas e considerando as peculiaridades da aciaria da Belgo-Usina de Monlevade, decidiu-se pela utilização da alternativa número 3 para a realização dos testes.

O trabalho foi dividido em 3 etapas:

- Etapa teórica;
- Etapa experimental;
- Etapa de validação do processo.

4.1 Etapa teórica:

4.1.1 Modelo para cálculo das adições

O primeiro passo da pesquisa foi o desenvolvimento de um modelo com base em um balanço de massa para cálculo da quantidade dos materiais a serem adicionados no convertedor. No modelo foram consideradas as características da carga metálica (gusa líquido + sucata), da cal calcítica, cal dolomítica e da escória recirculada. Foram considerados também outros parâmetros como rendimento do CaO, MgO, geração de finos, que exercem influência direta no processo. Com relação às demais variáveis com menor influência, denominadas variáveis de ruído, tentou-se fixar valores e/ou faixa compatíveis com o processo. Um exemplo dessas variáveis foi à escolha de um

mesmo grupo de aço para execução dos experimentos. A tela do modelo para os cálculos das adições com as variáveis de entrada e saídas é mostrado na figura 4.1.

	Gusa Líquido	Sucata		Si (GL)	P (GL)	MgO final desejado
kg			%			
Parada do sopro						
	Si (Sucata)	Si (banho)	CaO (Escória)	SiO ₂ (Escória)		Basicidade prevista inicial
%						
	Cal calc. necessária	Cal calc. a ser adicionada (sem esc. rec.)	Cal dolom. a ser adicionada (sem esc. rec.)	Cal calc. a ser adicionada (com esc. rec.)	Cal dolom. a ser adicionada (com esc. rec.)	Esc. recirc. a ser adicionada
kg						
	Peso SiO ₂ cal	Carga Total		Cal dissolvida até o momento		Peso esc. fundida até o momento
kg			%		kg	
	Basicidade Real			Redução de Custo(R\$/t)		
		R\$/t				

Figura 4.1 Tela com as entradas e saídas do modelo.

Ob.: O anexo 1 mostra maiores detalhes dos cálculos realizados pelo modelo

4.1.2 Balanço térmico

Foi realizado um balanço térmico, considerando o calor de aquecimento dos materiais a serem adicionados com as novas adições propostas para os experimentos. Além de poder estar comparando uma possível influência dessa variável dentro dos resultados da pesquisa, esse balanço foi necessário, uma vez que os experimentos foram realizados dentro do fluxo normal de produção. Uma variação brusca na temperatura com a nova adição poderia trazer transtornos operacionais para o processo.

4.1.3 Procedimentos operacionais

A elaboração dos procedimentos contemplando as principais atividades do processo envolvidas na execução dos experimentos exigiu uma atenção especial. Além do

objetivo dos resultados do experimento propriamente dito, foi motivo de preocupação as questões das possíveis interferências com o ritmo de produção e a segurança de equipamentos e pessoas. A execução de todas as fases dos experimentos foram previstas em paralelo com as atividades de rotina da aciaria.

A principal fonte para obtenção dos resultados foi à análise da escória para os diferentes momentos de sopro. A operação de retirada das amostras de escória tornou-se então uma atividade importante para o projeto. Os aspectos de segurança para a obtenção dessas amostras foram então incluídas nos procedimentos operacionais. Inicialmente foi previsto que as amostragens seriam realizadas com o convertedor na vertical com apenas a interrupção do sopro. Essa condição permite uma maior estabilidade da composição química da escória, evitando assim possíveis desvios. Para isso foi desenvolvido um dispositivo específico para esse fim. Esse dispositivo foi construído de um tubo para fixação do amostrador e duas braçadeiras para a fixação do mesmo na lança de oxigênio. As amostras foram retiradas com o auxílio da própria lança de oxigênio após interrupção do sopro. A figura 4.2 mostra alguns detalhes desse dispositivo.

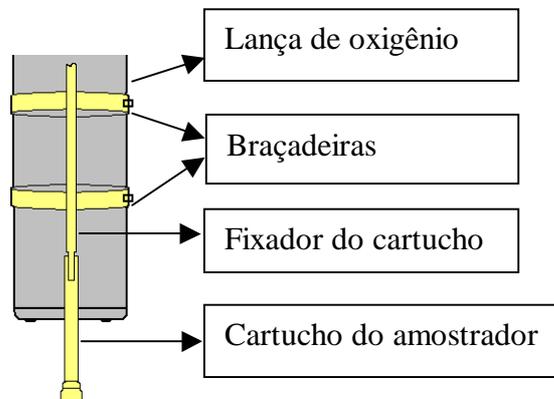
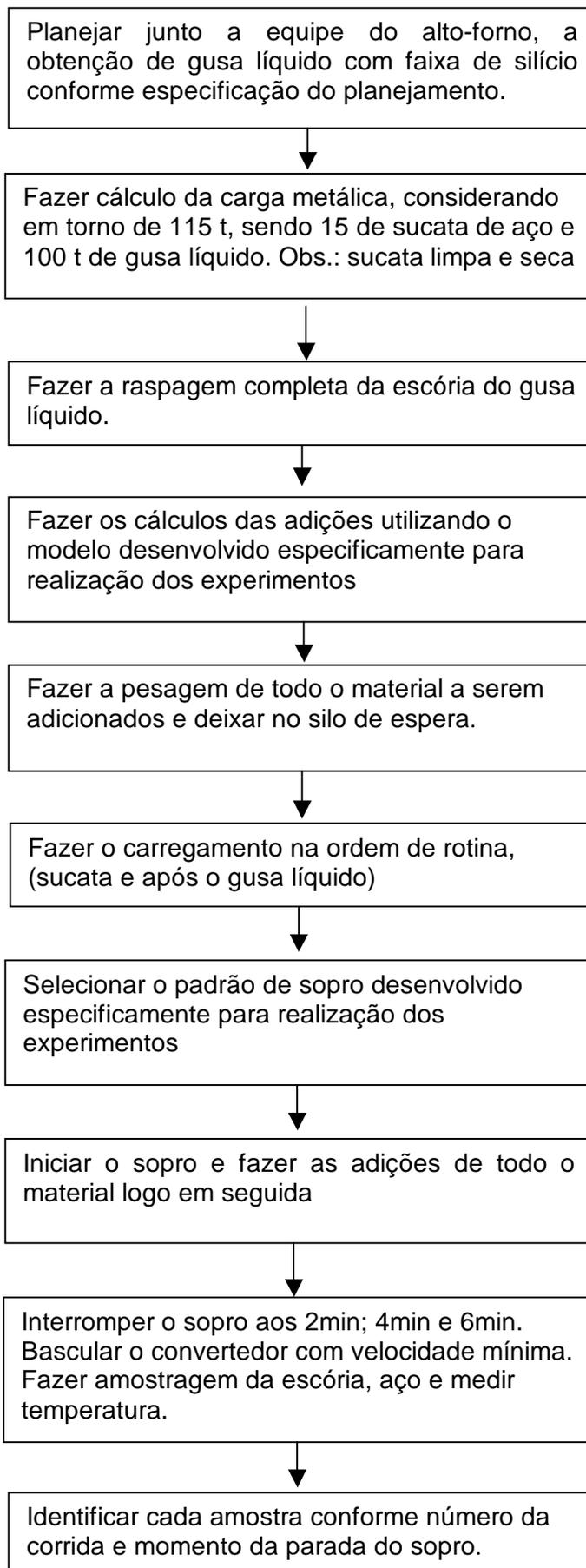


Figura 4.2 - Dispositivo para realização das amostragens sem basculamento do convertedor.

Durante os experimentos na fase exploratória, apareceram algumas dificuldades operacionais para a utilização desse dispositivo. A principal delas foi o tempo excessivo de amostragem e também a necessidade de se conhecer a temperatura à cada momento das amostragens. Em virtude dessas dificuldades, decidiu-se pela retirada das amostras com o convertedor basculado. Algumas alterações adicionais no procedimento foram necessárias, principalmente com relação aos aspectos de segurança. Essa operação é muito delicada, uma vez que no início de sopro a sucata

se encontra com fusão incompleta. Nessas condições podem ocorrer fortes reações quando a escória rica em FeO entra em contato com a sucata, ou até mesmo pela renovação da superfície de contato escória/banho considerando o alto teor de carbono do banho nesse período. Com relação à sucata, torna-se ainda mais crítico, no caso da utilização de sucata contendo alto teor de carbono. Ex.: sucata de gusa. No procedimento a principal atenção foi dada para a especificação da sucata com características especiais como: baixa umidade, dimensões, baixo teor de carbono. Também foi limitada a velocidade de basculamento do convertedor, para a mais baixa possível. O fluxo a seguir mostra as principais atividades previstas no procedimento para a execução dos experimentos:



Dentro dos procedimentos previstos para os experimentos, uma das variáveis que igualmente aos cálculos das adições, exerce grande peso para os resultados do processo, é o padrão de sopro utilizado. Para minimizar esse efeito foi desenvolvido um padrão específico e único para elaboração das corridas do experimento. A principal razão desse padrão foi garantir para ambas as condições previstas nos experimentos, os mesmos parâmetros de sopragem, principalmente com relação a penetração do jato de oxigênio no banho. A figura 4.3 mostra o padrão de sopro desenvolvido para o experimento.

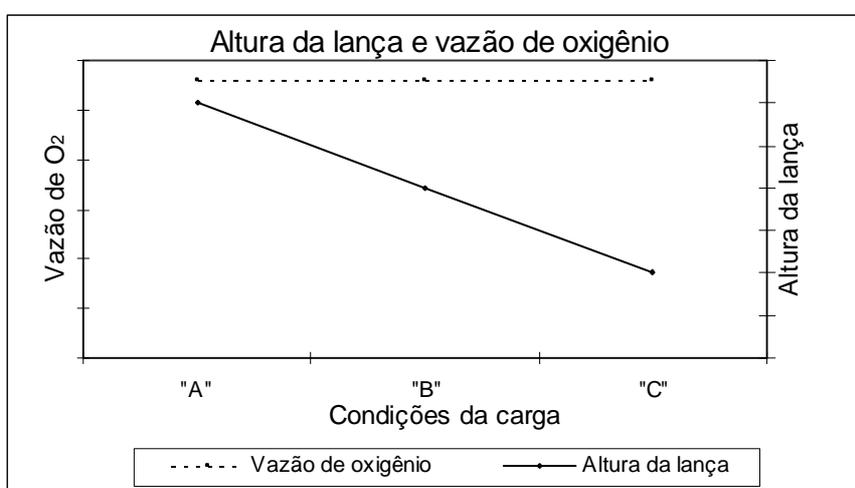


Figura 4.3 - Padrão de sopro desenvolvido para os experimentos

4.1.4 Análise de laboratório

As análises das escórias foram feitas pelo método fluorescência de raios "X" em equipamento ARL e também via úmida, para determinação do CaO livre. Para maior confiabilidade dos dados, foram realizadas réplicas em um laboratório externo (Magnesita, S/A).

4.1.5 Análise estatística

Inicialmente foi planejada a utilização da ferramenta DOE (design of experiments) para a análise dos resultados conforme previsto na proposta da dissertação. Foi elaborado um programa de experimento fatorial completo 2^3 (Werkema, 2000). Os fatores considerados foram o teor de silício, manganês do gusa líquido e a utilização da escória recirculada. Todos os fatores em 2 níveis. Devido às dificuldades de se

conseguir a adequação da composição do gusa líquido, foi fixado o teor de silício na faixa de 0,200% a 0,300%, considerada baixa para a aciaria da Belgo-Usina de Monlevade. O teor de manganês foi fixado na faixa de 0,300% a 0,450%, considerada normal de trabalho. A utilização da escória recirculada ficou então como o único fator a ser testado. As corridas realizadas sem a adição de escória recirculada foram definidas como condição “A” e com escória recirculada, como condição “B”. Em função dessas mudanças, foi conduzido um experimento com um fator e dois níveis, cuja análise dos resultados foi realizada com o auxílio da ferramenta estatística “teste de hipótese”.

Após a coleta das amostras das escórias e do metal para os diferentes momentos de sopro, as mesmas foram devidamente identificadas e analisadas. Para avaliação e análise estatísticas dos resultados foram estabelecidas duas hipóteses considerando as duas condições: condição “A” sem adição de escória recirculada e condição “B” com adição de escória recirculada. Para os compostos FeO, CaO, e P₂O₅ as hipóteses formuladas foram:

-H₀: média da condição “A” = média da condição “B”;

-H₁: média da condição “A” < média da condição “B”

Para o CaO livre as hipóteses foram:

-H₀: média da condição “A” = média da condição “B”;

-H₁: média da condição “A” > média da condição “B”

Foi utilizado o teste “t de student” por ser o mais indicado para tamanho pequeno de amostras (< 25). Para reforçar as conclusões obtidas com o teste paramétrico foi também realizado o teste não-paramétrico de Mann-Whitney o qual é realizado sobre a mediana.

4-2 Etapa experimental:

Essa etapa foi dividida em 2 fases:

4.2.1 Fase 1: Experimentos exploratórios

Os experimentos exploratórios foram realizados em algumas corridas, tendo como foco principal, os possíveis ajustes no modelo para cálculo das adições de fundentes e

adequação dos procedimentos que envolviam as principais atividades previstas para a realização dos experimentos.

4.2.2 Fase 2: Confirmatória

Nessa fase foi prevista a realização de duas seqüências de corridas. Uma primeira utilizando o processo convencional (condição "A") e uma segunda seqüência com a utilização de escória recirculada (condição "B"), substituindo parte da cal conforme proposição da pesquisa. As condições básicas para a realização dos experimentos foram mantidas conforme plano utilizado para a fase anterior.

4.3- Validação do processo

Embora o foco da pesquisa tenha sido a análise da influência da adição do material pesquisado em termos de formação de escória no primeiro período de sopro, uma avaliação dos possíveis impactos desse novo procedimento nos resultados finais do processo se fez necessário para a conclusão final da pesquisa. A taxa de desfosforação, tempo de sopro e o consumo de fundentes foram as variáveis respostas definidas para comparação. Para essa avaliação foi prevista a fabricação de uma seqüência de corridas utilizando escória recirculada (condição "B"). Para essas corridas, os cálculos das adições da cal calcítica, cal dolomítica e da escória recirculada foi feito utilizando o modelo desenvolvido especificamente para os experimentos. A carga metálica, padrão de sopro, adições de materiais refrigerantes, etc, foram feitas pelo modelo de rotina utilizado pela aciaria da Belgo-Usina de Monlevade. As variáveis respostas foram comparadas com uma seqüência de corridas elaboradas com os procedimentos convencionais sem adição de escória recirculada (condição "A"). Para minimizar possíveis efeitos de algumas variáveis de ruído, foi definido para ambas as condições "A" e "B", um mesmo grupo de aço.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Preparação da escória recirculada

Na Belgo-Usina de Monlevade, toda a escória gerada na aciaria, tanto de convertedor como de panela, são transportadas em potes idênticos para uma mesma planta de beneficiamento. Por isso foram tomados alguns cuidados especiais para que não houvesse mistura. A escória recirculada foi beneficiada em uma planta adaptada para obtenção das características físicas e composição química especificada. Após o beneficiamento foi feita a secagem (natural) da escória para redução da umidade. Só após então foi estocada nos silos da aciaria. A malha da peneira foi planejada para obtenção da granulometria de 10 à 50mm. A operação de peneiramento foi repetida duas vezes para garantir uma melhor pureza do material. Alguns detalhes do beneficiamento da escória são mostrados nas figuras nº 5.1 a 5.4 abaixo:



Figura 5.1-Transporte da escória para a peneira.



Figura 5.2 - Peneiramento



Figura 5.3 Escória pronta para o consumo



Figura 5.4- Detalhes da granulometria

A composição química média da escória recirculada utilizada nos experimentos é mostrada na tabela V.1.

Tabela V.1 - Composição química média da escória recirculada (% em peso)

SiO ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
14,17	23,87	6,67	1,32	1,2	45,07	7,07

5.2 Etapa teórica

5.2.1 Balanço térmico

O calor de aquecimento da escória recirculada não apresentou valor significativo comparado com os valores da cal calcítica e dolomítica. Considerando a quantidade de escória adicionada, essa diferença foi considerada irrelevante, e portanto desprezada. Os valores encontrados estão mostrados na tabela V.2.

Tabela V.2 - Calor de aquecimento das adições

Constituinte	Composição química (%)				(H ₁₇₀₀ -H ₂₉₈) (cal/mol)	(H ₁₇₀₀ -H ₂₉₈) em 100 kg de material (kcal)		
	Escória recirculada	Cal dolomítica	Cal calcítica	Peso molecular		Esc. Recirculada.	Cal dolomítica.	Cal calcítica.
CaO	45,07	51,5	95,82	56,08	17440	14016	16016	29799
MgO	7,07	35,5	0,37	40,32	16350	2867	14395	150
SiO ₂	14,17	3,9	1,31	60,09	22940	5410	1489	500
Fe ₂ O ₃	0	3,2		159,7	48100	0	964	0
FeO	23,87	0	0	68,89	26110	9047	0	0
MnO	6,67	0	0	70,94	17970	1690	0	0
Al ₂ O ₃	1,2	0	0	101,95	40100	472	0	0
Total de calor (kcal)						33501	32864	30449

5.2.2 Modelo para o cálculo das adições

Antes da elaboração das corridas, foram realizadas algumas simulações com o modelo. A figura 5.5 mostra os valores referente a uma simulação aleatória. Nesse caso foi simulada as adições para uma corrida, considerando o teor de silício do gusa líquido de 0,250% e carga metálica total de 108 toneladas. Para a massa e percentual de escória fundida foi considerada uma análise aproximada aos quatro minutos de sopro.

	Gusa Líquido	Sucata		Si (GL)	P (GL)	MgO final desejado	
kg	93000	15000		%	0,250	0,100	10,00
Parada do sopro							
	Si (Sucata)	Si (banho)	CaO (Escória)	SiO₂ (Escória)		Basicidade prevista inicial	
%	0,250	0,100	35,00	19,24		3,50	
	Cal calc. necessária	Cal calc. a ser adicionada (sem esc. rec.)	Cal dolom. a ser adicionada (sem esc. rec.)	Cal calc. a ser adicionada (com esc. rec.)	Cal dolom. a ser adicionada (com esc. rec.)	Esc. recirc. a ser adicionada	
kg	2612	2419	2469	1754	1740	2532	
	Peso SiO₂ cal	Carga Total		Cal dissolvida até o momento		Peso esc. fundida até o momento	
kg	41,93	108000		%	31,02	kg	3139
	Basicidade Real		Redução de Custo(R\$/t)				
	1,82		R\$/t	2,09			

Figura 5.5 - Tela com as entradas e saídas do modelo (valores simulados)

5.3 Etapa experimental

5.3.1 Experimentos exploratórios

5.3.1.1 Ajustes do modelo de cálculos das adições

Foram realizadas 10 corridas como experimentos exploratórios. Com avaliação dos resultados da composição química da escória, temperatura do banho metálico,

observações visuais do aspecto físico da escória, etc, foram realizadas algumas correções no modelo de cálculo das adições. O principal ajuste foi com relação a características e proporção de sucata na carga metálica e da quantidade de escória recirculada no total de fundentes. A quantidade de sucata que mais adequou às condições, foi um valor entre 15% a 20% sobre a carga total. Ficou restrita a utilização de apenas sucata de aço especial com densidade intermediária. A principal razão para essa definição, foi obter a fusão mais uniforme possível da sucata e garantir não sobrar resto de aço no forno. Com base nesses resultados, a carga metálica padrão para os experimentos foi definida com um valor em torno de 20 tonelada de sucata, para uma massa de gusa líquido em torno de 95 toneladas. Com relação à escória recirculada, os valores foram proporcionais ao teor de silício do gusa para a faixa de 0,200% a 0,350% conforme modelo de cálculo. Foi fixado um valor máximo de 3000kg para teor de silício do gusa < 0,200% e nulo para teor de silício menor que 0,350%.

5.3.1.2 Adequação dos procedimentos operacionais

Algumas alterações nos procedimentos operacionais foram necessárias. Foi alterada a seqüência para realização das amostragens, sendo definida a seguinte ordem: escória, temperatura e por último a amostra de aço. Foi fixado também como referência, o ângulo de basculamento do forno para a posição de amostragem. Essa mudança foi importante, e se fez necessária para minimizar a saída de escória durante a amostragem. Caso ocorresse poderia levar a erros, e trazer prejuízos para os resultados dos experimentos.

5.3.2 Experimentos confirmatórios

Depois de realizados os ajustes mencionados acima, foram elaboradas 16 corridas, sendo 8 corridas sem adição de escória (condição "A") e 8 corridas com adição de escória recirculada (condição "B"), para obtenção dos resultados finais. Das 8 corridas sem adição de escória, foram desconsideradas 2 delas por problemas operacionais de rotina que poderiam causar desvios nos resultados. O grupo de aço escolhido para realização dos experimentos foi baixo teor de carbono, similar ao SAE 1010.

5.3.2.1 Peso e composição química da carga metálica utilizada

Foi planejado com uma certa antecedência junto a equipe responsáveis pela operação do alto-forno, a produção de gusa líquido visando a composição química conforme faixa especificada para os experimentos. A média e o desvio padrão do teor de silício do gusa líquido obtido foi de 0,276% e 0,027% para a condição “A” e de 0,301% e 0,027 para as corridas da condição “B” respectivamente.

Mesmo tendo a necessidade de atender ao tamanho padrão das corridas, uma vez que os experimentos foram realizados junto com a operação de rotina da aciaria, a proporção entre o gusa líquido e sucata com o peso total da carga, foram definidos de forma a atender às condições mais adequadas para os experimentos, conforme indicado pela fase exploratória. O peso médio total de aço líquido por corrida foi de 110,3 t para a condição “A” e 108,0 t para a condição “B”. Enquanto que pelas condições operacionais do momento e conforme norma, os pesos visados deveriam ser de 115 t para a condição “A” e 111 t para a condição “B”. Vale a pena enfatizar que, a preocupação de se conseguir as características operacionais mais similares possíveis entre as diferentes condições dos experimentos, foi de fundamental importância para os resultados como um todo. A composição química da sucata foi considerada a média conforme padrão adotado pela aciaria. As tabelas V.3 e V.4 mostram a composição química e peso da carga metálica utilizada nos experimentos.

Tabela V.3 - Composição química e peso da carga metálica para a condição “A”.

Nº Corrida	Gusa líquido					Sucata total(t)				Aço liq.
	%Si	%Mn	% P	Temp. (°C)	Peso(t)	%Si	%Mn	% P	Peso(t)	
77463	0,305	0,449	0,107	1342	92,0	0,300	0,450	0,015	26,1	108,3
77497	0,286	0,444	0,111	1321	99,4	0,300	0,450	0,015	25,1	112,7
77738	0,278	0,393	0,115	1314	94,0	0,300	0,450	0,015	25,2	111,1
81735	0,295	0,298	0,094	1355	98,8	0,300	0,450	0,015	15,2	107,4
82609	0,230	0,410	0,097	1363	99,8	0,300	0,450	0,015	20,0	110,6
82610	0,260	0,470	0,112	1355	98,6	0,300	0,450	0,015	20,0	111,7
Média	0,276	0,411	0,106	1342	97,1	0,300	0,450	0,015	21,9	110,3
Desvio	0,027	0,062	0,009	20	3,3	0,000	0,000	0,000	4,3	2,0

Tabela V.4 - Composição química e peso da carga metálica para a condição "B".

Nº Corrida	Gusa líquido					Sucata total (t)				Aço liq.
	%Si	%Mn	% P	Temp. °C	Peso(t)	%Si	%Mn	% P	Peso (t)	
78179	0,284	0,386	0,107	1347	98,5	0,300	0,450	0,015	25,1	113,6
78180	0,273	0,419	0,101	1353	96,4	0,300	0,450	0,015	25,1	109,6
81730	0,298	0,367	0,097	1360	99,6	0,300	0,450	0,015	15,1	106,1
81731	0,330	0,400	0,107	1367	99,6	0,300	0,450	0,015	15,0	103,2
81733	0,330	0,371	0,102	1395	93,0	0,300	0,450	0,015	15,0	109,7
81734	0,321	0,378	0,099	1352	102,8	0,300	0,450	0,015	15,0	106,3
82611	0,340	0,730	0,101	1359	96,7	0,300	0,450	0,015	20,1	107,6
82672	0,277	0,347	0,101	1336	99,8	0,300	0,450	0,015	17,3	108,0
Média	0,307	0,425	0,102	1359	98,3	0,300	0,450	0,015	18,5	108,0
Desvio	0,027	0,125	0,004	17	2,9	0,000	0,000	0,000	4,5	3,1

5.3.2.2 Consumo de fundentes.

A quantidade de cal calcítica, dolomítica e de escória recirculada adicionadas foram calculadas pelo modelo do experimento. O objetivo principal do modelo foi atender ao volume de escória mínimo necessário ao processo. As demais adições para ajustes do balanço térmico e para atender a outras necessidades de rotina do processo, foram complementadas conforme padrões operacionais existentes, após a última interrupção do sopro prevista para o experimento. O consumo de fundentes para os duas condições "A" e "B" é mostrado nas tabelas V.5 e V.6

Tabela V.5 - Consumo de fundentes das corridas elaboradas na condição "A".

Corrida	Cal calcítica. (kg/t)	Cal dolomítica. (kg/t)	Escória. recirculada. (kg/t)
77463	22,2	22,6	0,00
77497	21,9	23,1	0,00
77738	23,4	22,1	0,00
81735	19,8	19,8	0,00
82609	22,6	22,6	0,00
82610	22,4	22,4	0,00
Média	22,0	22,1	0,00
Desvio	1,23	1,18	0,00

Tabela V.6 - Consumo de fundentes das corridas elaboradas na condição "B".

Corrida	Cal calcítica. (kg/t)	Cal dolomítica. (kg/t)	Escória. recirculada. (kg/t)
78179	18,27	19,58	12,90
78180	17,66	17,85	17,34
81730	18,85	19,13	17,81
81731	21,32	21,32	11,63
81733	20,05	20,05	10,94
81734	19,76	19,76	12,23
82611	20,45	20,45	11,15
82672	18,35	18,35	21,10
Média	19,34	19,56	14,39
Desvio	1,25	1,12	3,82

5.3.2.3 Composição química da cal calcítica e dolomítica utilizadas.

Tabela V.7 - Comp. química das cales utilizadas em ambas as condições (% em peso)

Tipo de cal	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PPC	P
Calcítica	1,3	0,2	95,8	0,4	0,7	0,06
Dolomítica	3,9	3,2	51,5	35,5	3,8	0,06

5.3.2.4 Temperatura do banho

Não houve diferença significativa para a temperatura. Esse resultado foi importante, uma vez que a temperatura tem peso significativo para o comportamento das variáveis em questão. Os resultados da evolução da temperatura para os diferentes momentos do sopro, para as duas condições, com e sem adição de escória recirculada são mostrados na figura 5.6.

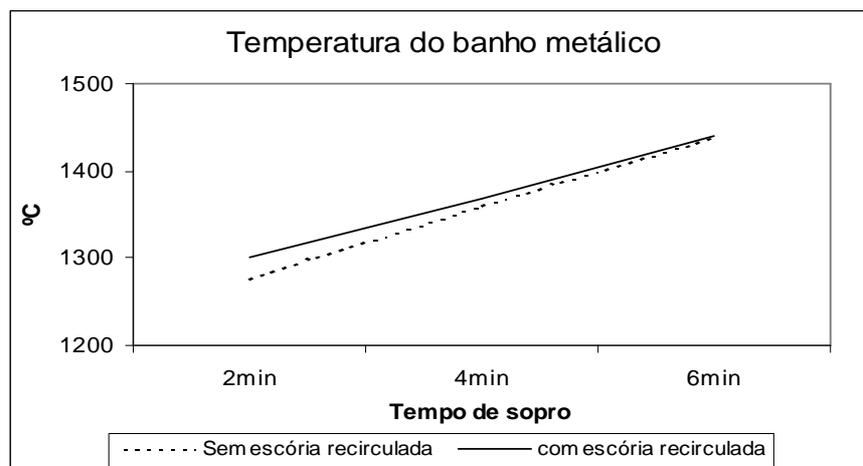


Figura 5.6 - Evolução da temperatura do banho metálico

5.3.2.5 Aspecto físico da escória

Todas as amostragens foram realizadas com o basculamento do convertedor. Essa condição possibilitou que fossem feitas observações visuais do aspecto físico da escória, e comparar essa variável entre as condições “A” e “B”. Essas informações foram importantes e contribuíram de maneira significativa na condução dos experimentos. Ficou evidente que, para a condição “B”, a quantidade de escória líquida foi maior, principalmente a partir do 2º minuto de sopro. Na segunda parada que ocorreu aos 4 min, foi nítida a diferença entre as duas condições. Para a condição “B”, onde foi adicionada escória recirculada, havia visualmente uma quantidade maior de escória líquida comparando com a condição “A”, o mesmo ocorrendo aos 6 min de sopro.

Outro resultado positivo também observado, foi a não aderência de metal na lança e na borda do convertedor. Trabalhos já realizados internamente na Belgo, já comprovaram forte correlação dessa variável com as características físicas da escória. O aspecto físico da escória para os diferentes momentos de sopro, comparando as duas condições, com e sem adição de escória recirculada, é mostrado nas figuras 5.7 a 5.12.



Figura 5.7 - Foto do banho aos 2 min de sopro (condição "A")

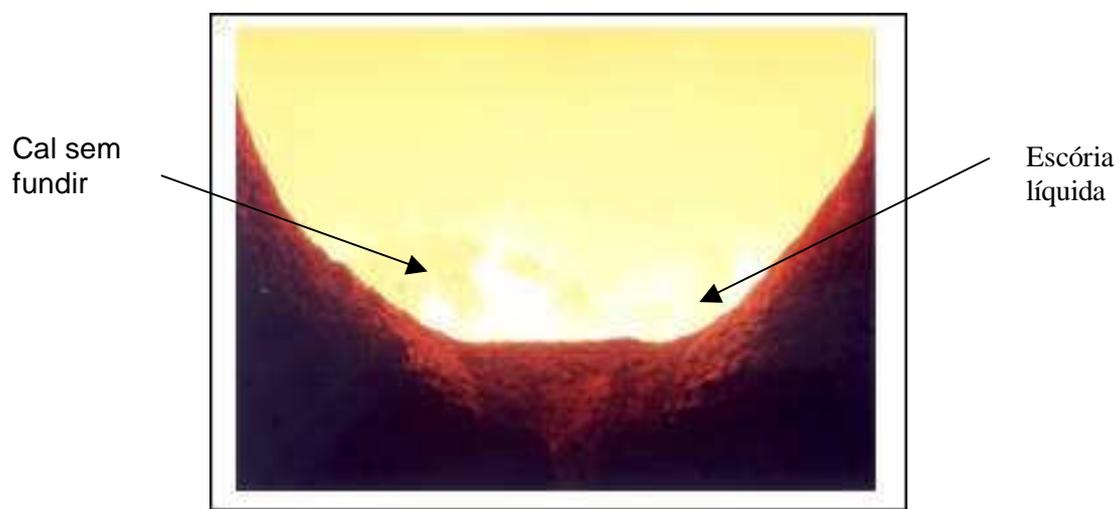


Figura 5.8- Foto do banho aos 2 min de sopro (condição "B")

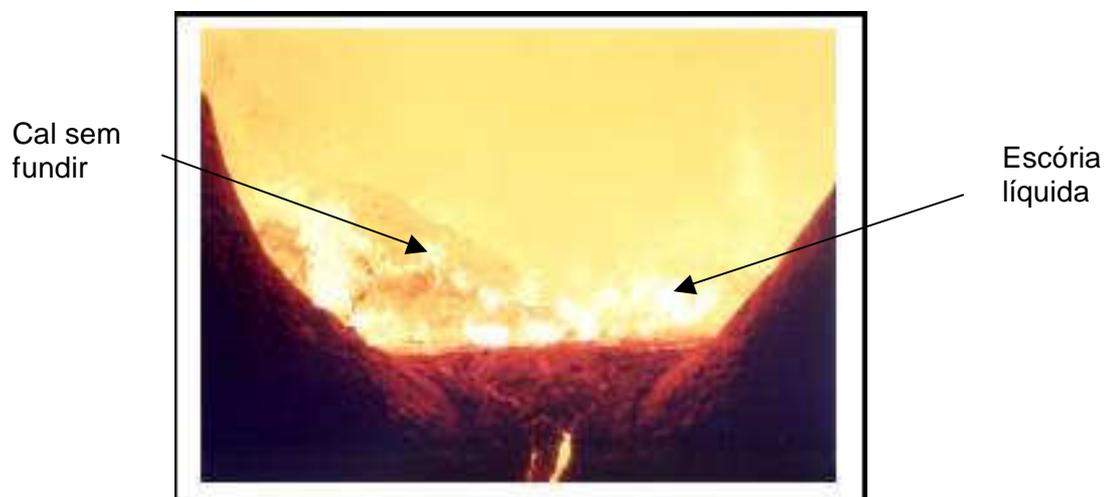


Figura 5.9 - Foto do banho aos 4 min de sopro (condição "A")

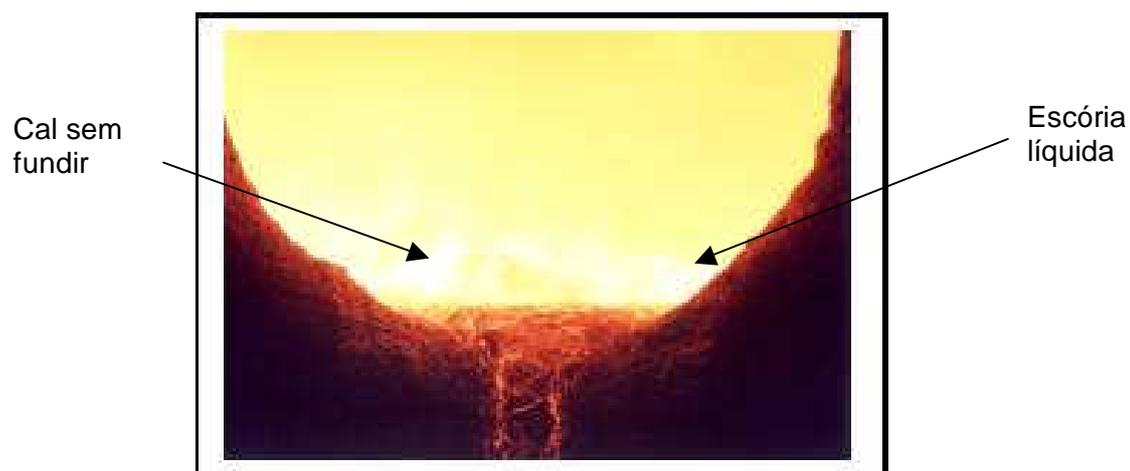


Figura 5.10 - Foto do banho aos 4 min de sopro (condição "B")

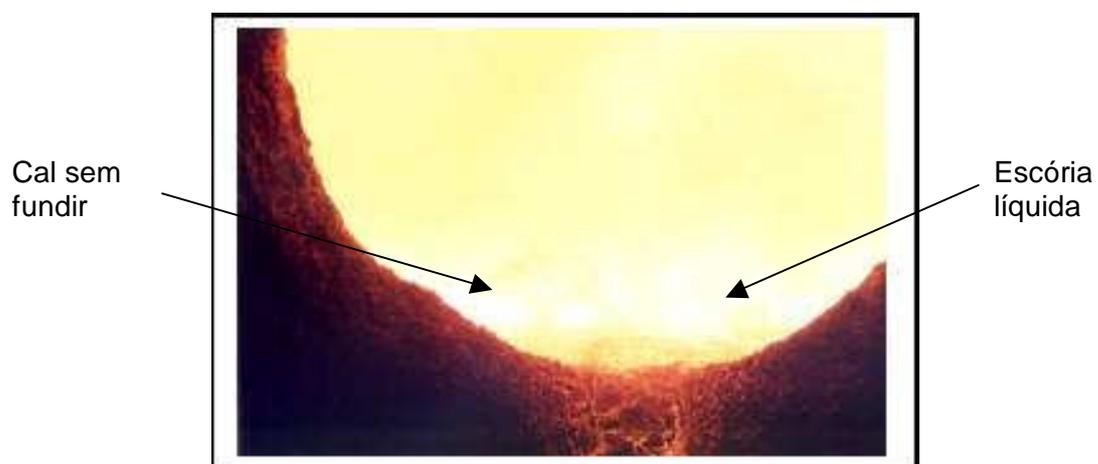


Figura 5.11 - Foto do banho aos 6 min de sopro (condição "A")

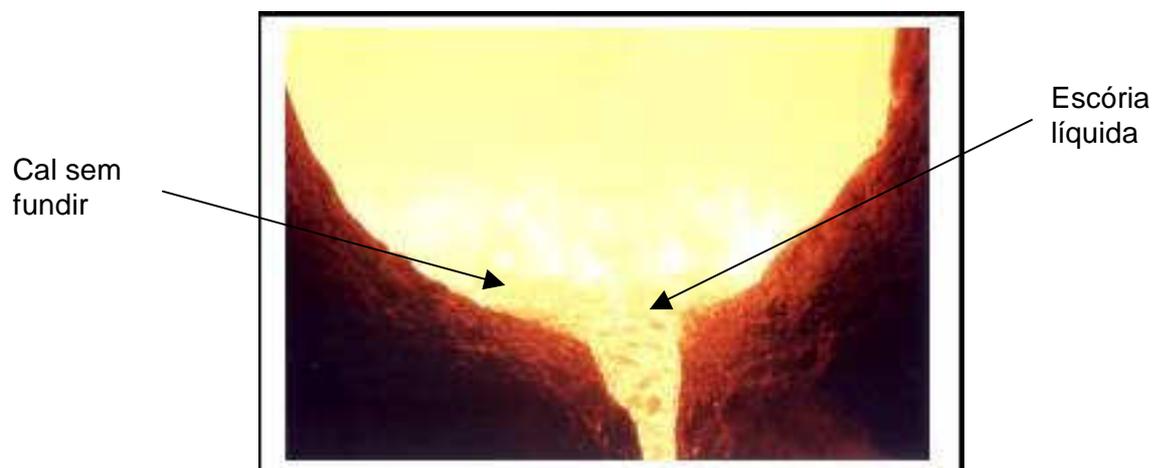


Figura 5.12 - Foto do banho aos 6 min de sopro (condição "B")

5.3.2.6 Massa e percentual de escória líquida

Através do modelo foi feito um cálculo aproximado da evolução da massa de escória líquida gerada nos diferentes momentos do sopro através do balanço da sílica. Da mesma forma, e utilizando o balanço de CaO, foi calculado também o percentual de cal dissolvida para cada momento. Os resultados encontrados para a massa de escória e o percentual de cal fundida para os diferentes momentos de sopro são mostrados nas figuras 5.13 e 5.14.

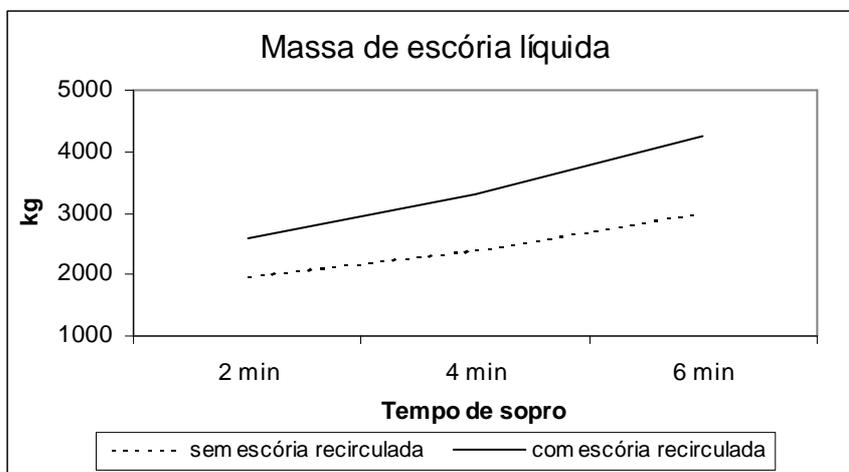


Figura 5.13 - Massa de escória líquida

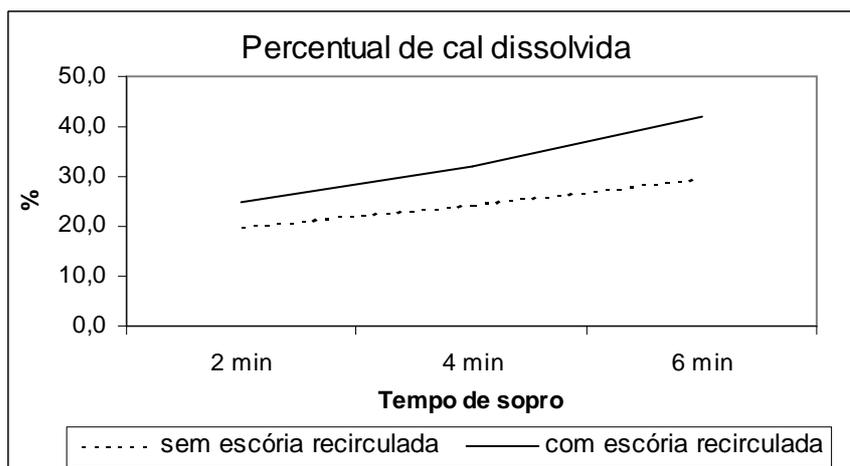


Figura 5.14 - Percentual de cal fundida

5.3.2.7 Composição química da escória

As amostras foram analisadas pelo método de espectrometria de fluorescência de raio “X” e também por via úmida. Foi realizada também análise em um laboratório externo. As diferenças entre os laboratórios não foram significativas. Os resultados considerados na pesquisa foram pelo método de via úmida. As amostras 1^a, 2^a e 3^a correspondem ao tempo de sopro de 2min, 4min e 6min, respectivamente. A evolução da composição química da escória aos 2min, 4min e 6min de sopro é mostrada nas tabelas V.8 e V.9, para as duas condições propostas, com e sem adição de escória recirculada.

Tabela V.8 - Composição química da escória das corridas da condição “A”

Corrida	%CaO			%SiO ₂			%FeO			%P ₂ O ₅		
	Amostras			Amostras			Amostras			Amostras		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
77463	27,4	33,2	26,8	23,6	24,7	26,0	21,3	12,6	18,5	2,0	2,8	2,8
77497	30,8	29,1	27,7	19,1	16,2	14,8	17,2	20,7	13,9	2,6	2,4	1,5
77738	22,8	28,3	38,5	16,7	19,5	18,5	23,6	12,2	7,9	2,8	2,6	2,1
82609	29,4	29,4	32,5	19,4	18,5	18,0	21,5	26,7	22,8	3,5	3,8	4,5
82610	32,0	28,7	31,2	16,1	23,2	18,7	21,3	21,8	25,7	2,9	3,8	3,8
81735	29,5	30,2	30,3	23,8	22,2	19,3	19,2	20,5	25,9	3,5	4,6	4,3
Média	28,7	29,8	31,2	19,8	20,7	19,2	20,7	19,1	19,1	2,9	3,3	3,2
Desvio	3,2	1,8	4,2	3,3	3,2	3,7	2,2	5,6	7,2	0,6	0,9	1,2

Corrida	%Al ₂ O ₃			%MnO			%MgO			%CaO livre		
	Amostras			Amostras			Amostras			Amostras		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
77463	1,9	3,3	2,5	10,4	9,3	7,3	12,1	12,5	10,7	1,2	1,7	5,4
77497	2,7	2,3	3,7	13,7	13,1	4,7	10,1	13,3	19,7	3,8	3,0	14
77738	4,9	6,3	5,1	11,7	11,1	7,5	15,7	17,8	17,4	1,6	2,3	3
82609	2,0	2,4	2,4	14,4	11,7	9,2	5,4	5,3	6,6	4,4	2,1	4,2
82610	1,8	2,9	2,6	10,7	12,7	9,1	8,3	5,1	6,3	7,0	1,7	2,6
81735	1,6	1,7	1,6	14,0	12,5	9,8	6,2	6,6	6,7	2,2	1,7	2
Média	2,5	3,1	3,0	12,5	11,7	7,9	9,7	10,1	11,2	3,4	2,1	5,2
Desvio	1,3	1,6	1,3	1,8	1,4	1,9	3,9	5,2	6	2,2	0,5	4,5

Tabela V.9 - Composição química da escória das corridas da condição "B".

Corrida	%CaO			%SiO ₂			%FeO			%P ₂ O ₅		
	Amostras			Amostras			Amostras			Amostras		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
78179	29,7	34,8	49,6	17,6	19,9	12,6	30,0	20,7	14,0	2,5	2,6	2,8
78180	28,5	28,2	32,3	21,1	18,9	21,2	16,0	25,1	18,4	3,1	2,8	3,1
81730	30,3	32,7	33,9	21,3	22,1	20,5	19,8	16,2	19,5	3,5	4,4	4,7
81731	30,3	30,1	33,8	25,8	23,4	20,9	16,3	21,1	21,8	3,1	3,9	4,0
81733	29,0	32,2	36,1	21,9	21,0	20,4	20,4	21,2	20,1	3,5	4,5	4,5
81734	29,1	32,8	36,5	23,2	23,6	21,2	18,1	16,2	17,4	3,2	4,6	4,8
82611	22,9	26,2	30,6	21,9	20,8	18,8	31,1	27,7	28,2	2,4	2,9	3,2
82672	29,1	31,7	35,4	19,3	19,3	20,2	22,6	22,4	20,4	3,5	4,6	5,5
Média	28,6	31,1	36,0	21,5	21,1	19,5	21,8	21,3	20,0	3,1	3,8	4,1
Desvio	2,4	2,8	5,8	2,4	1,8	2,9	5,8	3,9	4,1	0,4	0,9	1,0

Corrida	%Al ₂ O ₃			%MnO			%MgO			%CaO livre		
	Amostras			Amostras			Amostras			Amostras		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
78179	2,6	2,8	1,8	3,4	4,5	4,8	10,5	13,1	13,1	3,6	2,0	2,3
78180	2,2	3,2	2,8	12,4	10,1	9,8	14,2	10,5	11,2	2,5	1,4	2,1
81730	3,5	4,7	3,2	13,2	11,9	7,1	5,8	6,7	7,1	2,6	1,3	5,5
81731	2,9	2,8	2,8	13,9	11,7	7,5	6,0	6,3	7,3	1,7	0,9	2,2
81733	1,9	2,2	2,5	12,9	10,8	7,5	6,1	6,5	7,3	4,2	1,5	1,8
81734	2,7	2,4	2,3	12,9	11,6	7,5	6,8	7,2	8,4	4,0	1,5	1,8
82611	2,1	2,6	2,3	12,6	11,0	7,1	5,4	6,8	7,4	1,6	2,0	3,1
82672	1,5	1,7	1,5	11,5	9,8	7,1	7,4	7,4	7,2	5,0	3,0	3,5
Média	2,4	2,8	2,4	11,6	10,2	7,3	7,8	8,0	8,6	3,2	1,7	2,8
Desvio	0,6	0,9	0,5	3,4	2,4	1,3	3,0	2,4	2,3	1,2	0,6	1,3

A evolução de cada composto químico da escória para as duas condições, pode ser melhor observada através da seqüência de gráficos a seguir nas figuras 5.15 a 5.22. Conforme mostra a figura 5.15, as corridas elaboradas com escória recirculada, apresentaram teor de CaO superior quando comparado com as corridas elaboradas sem utilização de escória recirculada. Já o teor de CaO livre, conforme pode ser observado na figura 5.22, foi menor para essa mesma seqüência de corridas. A análise conjunta dessas duas figuras, considerando os valores da massa e percentual de escória líquida calculados para os diferentes momentos de sopro, mostra que houve uma maior dissolução da cal nas corridas com adição de escória recirculada.

Esse fato pode ser explicado pelo efeito positivo da escória recirculada sobre a dissolução da cal.

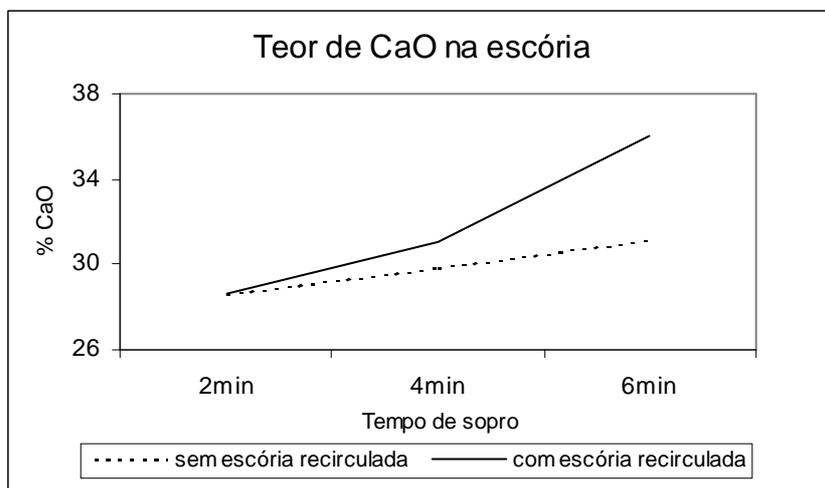


Figura 5.15 -Teor de CaO na escória

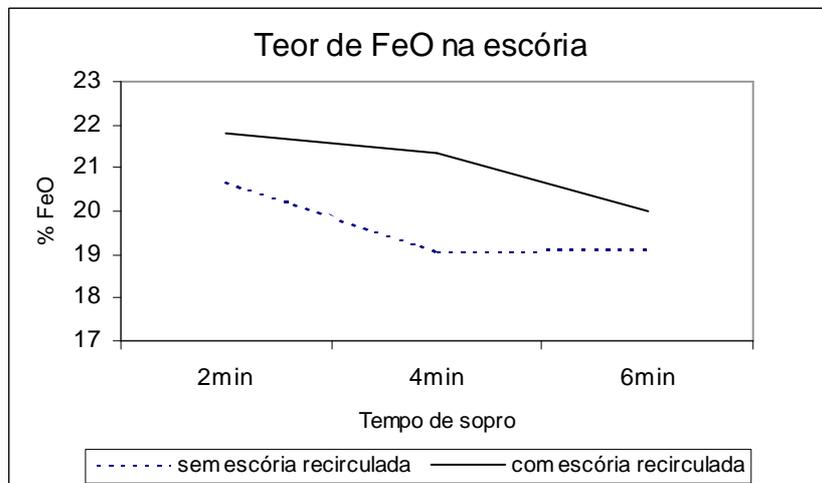


Figura 5.16 -Teor de FeO na escória

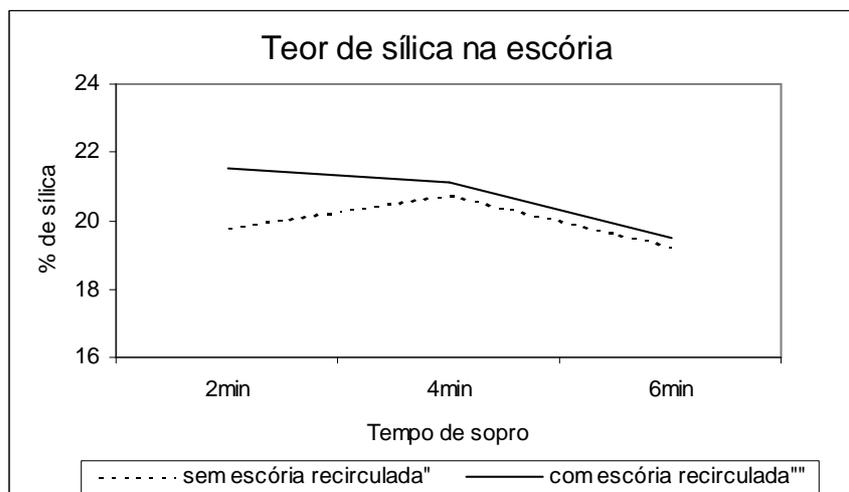


Figura 5.17-Teor de sílica na escória

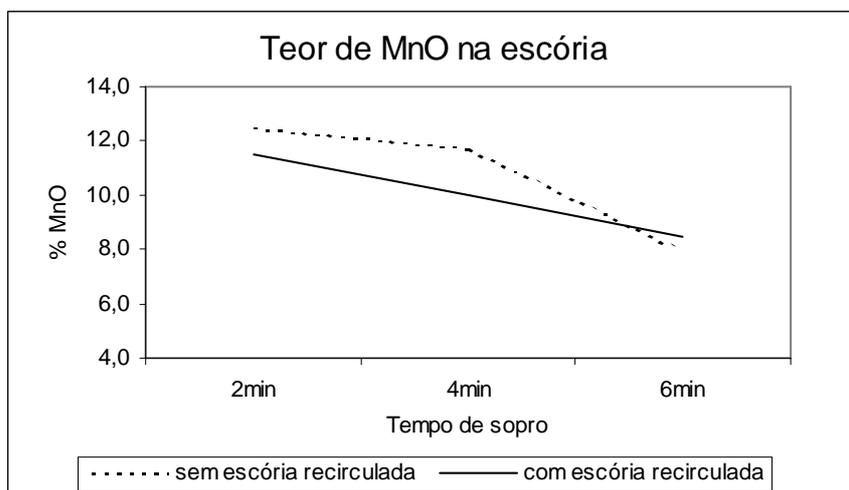


Figura 5.18-Teor de MnO na escória

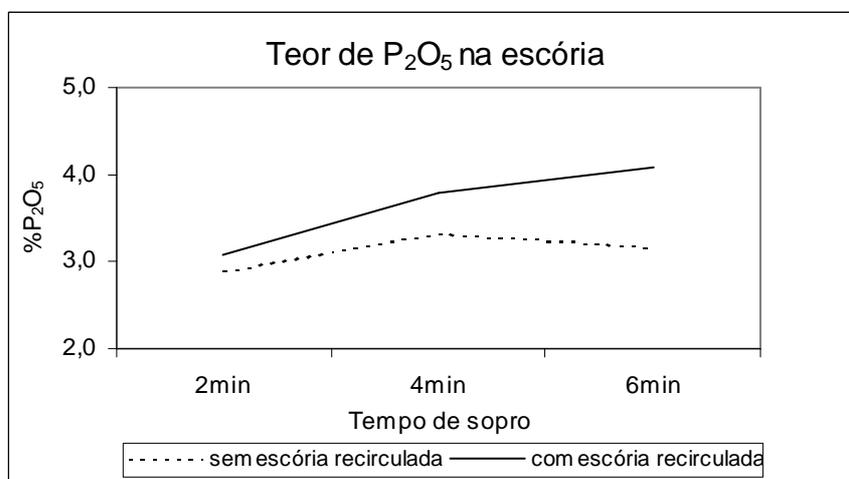


Figura 5.19-Teor de P_2O_5 na escória

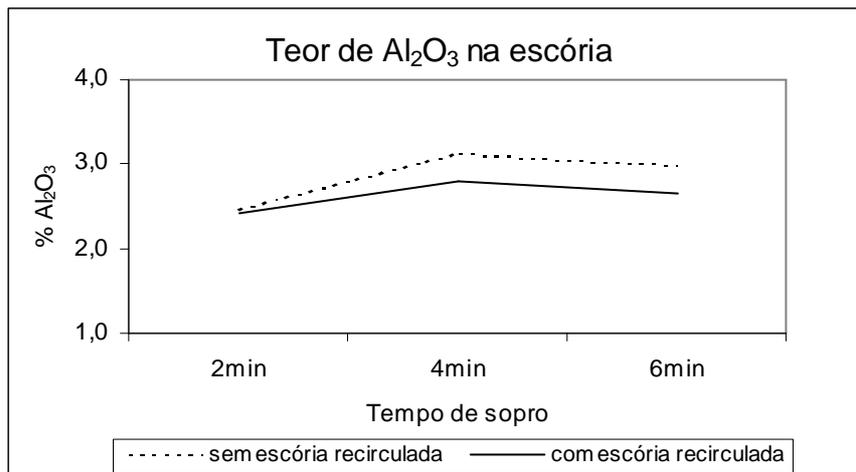


Figura 5.20 -Teor de Al_2O_3 na escória

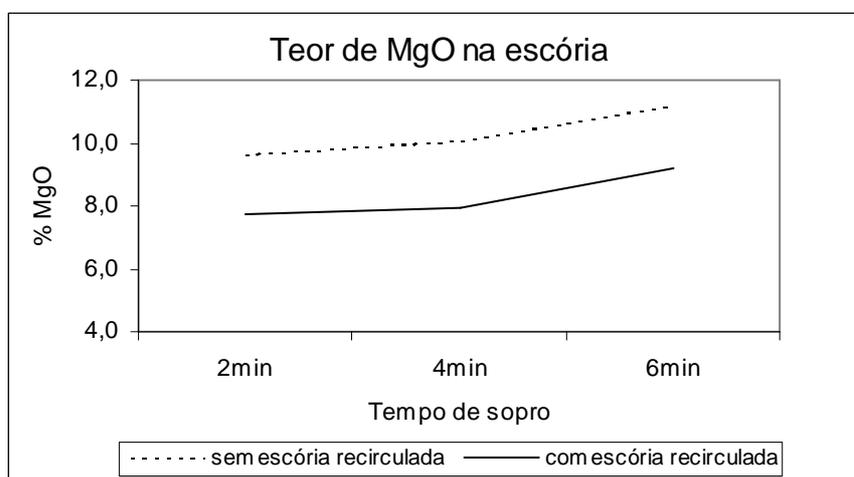


Figura 5.21 -Teor de MgO na escória

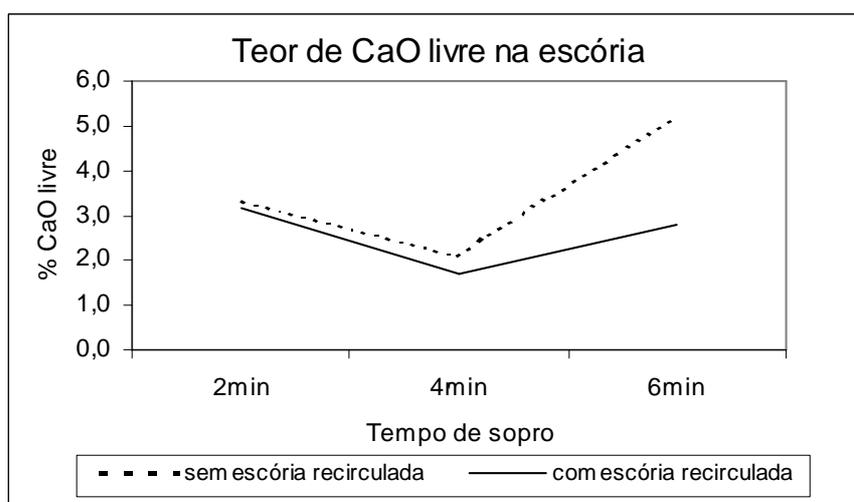


Figura 5.22 -Teor de CaO livre na escória

5.3.2.8 Temperatura de liquidus da escória

As análises das escórias foram lançadas no diagrama CaO.FeO.SiO_2 , % em peso. As figura 5.23, 5.24 e 5.25 a seguir mostram os ternários referentes as escórias aos 2min, 4min e 6min respectivamente, para cada condição do experimento.

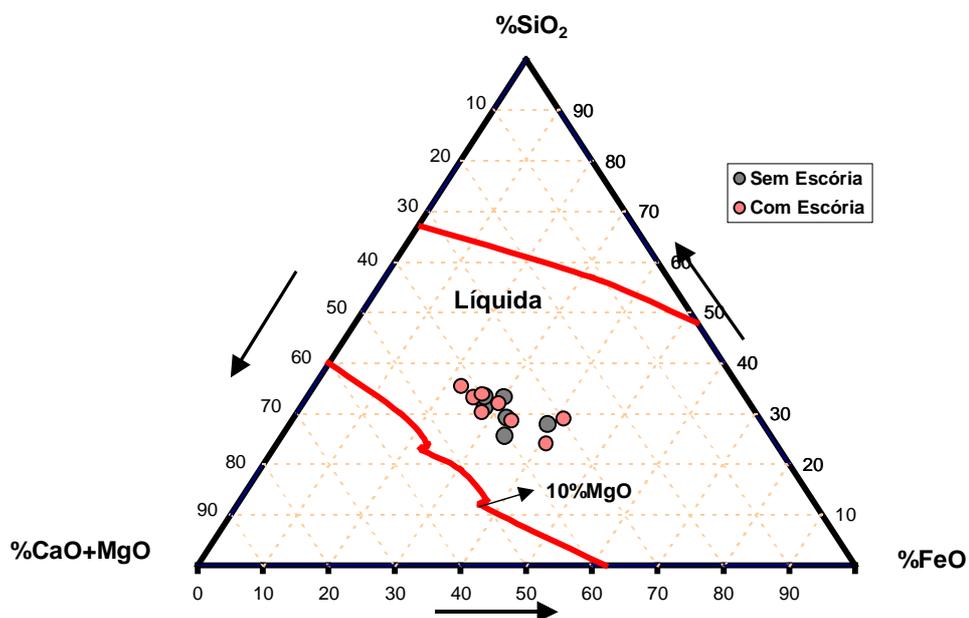


Figura 5.23- Ternário CaO.FeO.SiO_2 , com os pontos representando o campo para as escórias aos 2 min de sopra.

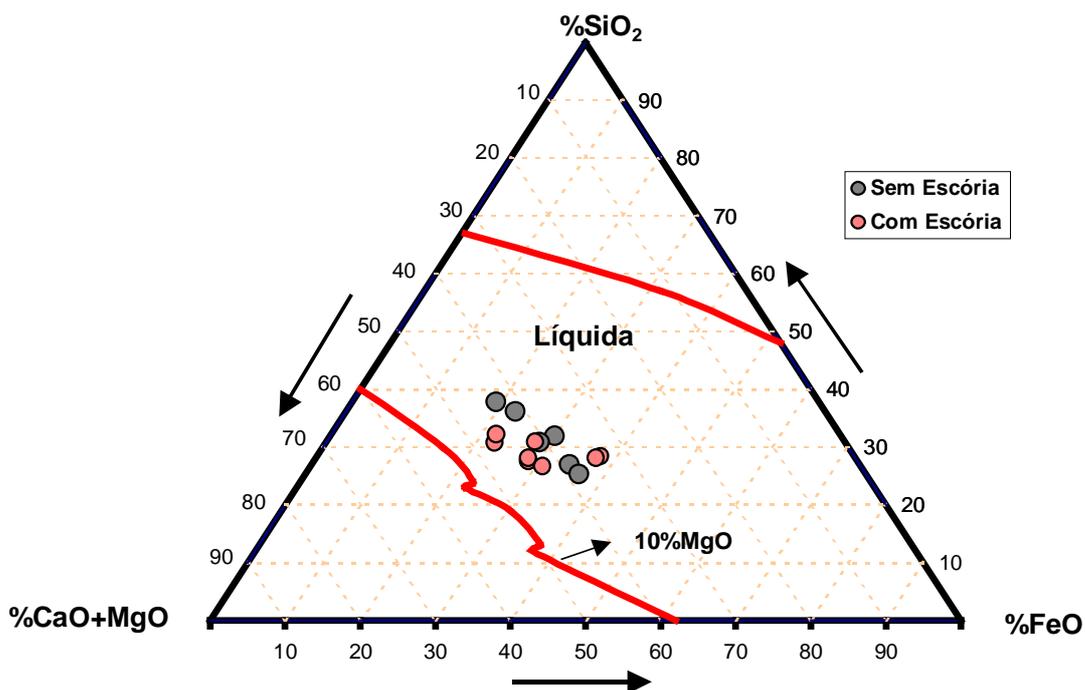


Figura 5.24 - Ternário CaO.FeO.SiO_2 , com os pontos representando o campo para as escórias aos 4 min de sopro.

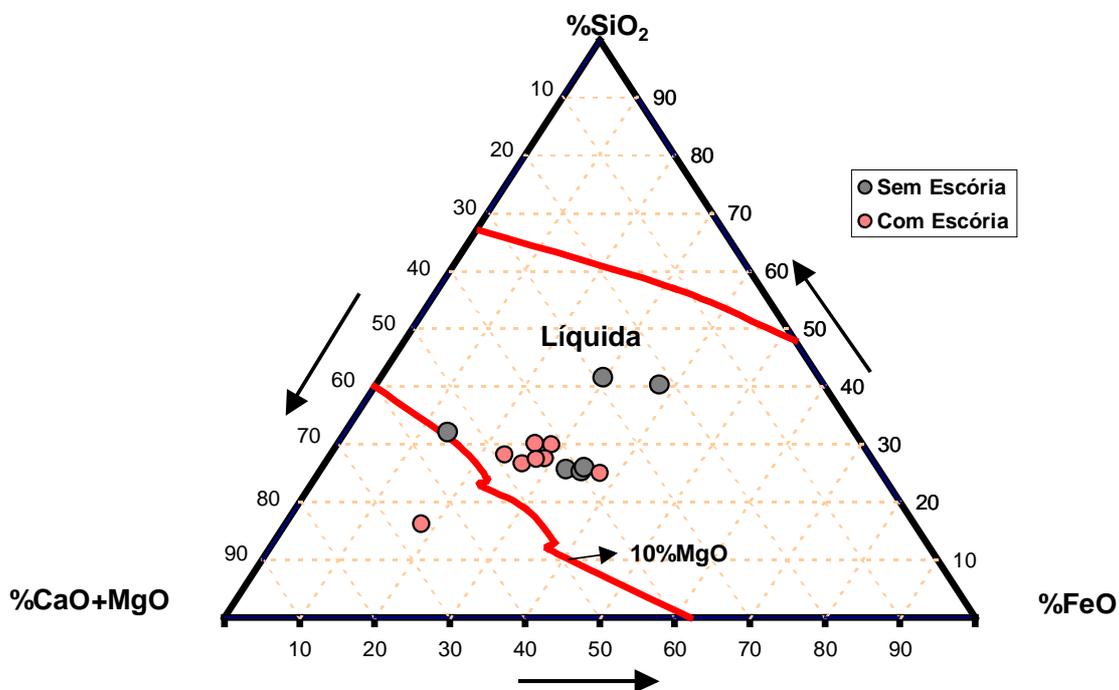


Figura 5.25 - Ternário CaO.FeO.SiO_2 , com os pontos representando o campo para as escórias aos 6 min de sopro.

Sobre as figuras 5.23, 5.24 e 5.25, mostradas anteriormente pode-se observar que: As escórias para ambas as condições do experimento ocupam regiões bem próximas no diagrama. Apesar dessas pequenas diferenças, esse fato torna-se relevantes, considerando as diferenças existentes nos agentes formadores das escórias adicionados para as duas condições, ou seja, a escória recirculada participou do processo conforme hipóteses formuladas para os experimentos. Nos três diagramas observa-se que existem escórias no campo sólido. Esse fato pode ser explicado pela redução do FeO durante a operação do basculamento do convertedor que renova a superfície de contato metal/banho. Como as amostragens das escórias foram realizadas logo em seguida a essa operação, a redução do FeO pode ter sido facilitada por essa variável. Esse fato ficou evidenciado pelas observações visuais durante os experimentos. Essa hipótese é reforçada quando se observa que as escórias aos 4min e 6 min têm mais pontos no campo do sólido no diagrama. Dessas observações pode-se concluir que, no momento da interrupção do sopro, as escória estavam com o teor maior de FeO e portanto participando do processo. Essa conclusão foi confirmada na fase seguinte dos experimentos, onde se procurou avaliar os resultados de processo no final de sopro.

5.3.2.9 Composição química do banho

Embora no processo LD o banho se apresenta bastante heterogêneo nos primeiros minutos de sopro, os resultados da evolução da sua composição química nos diferentes momentos do sopro, apresentou tendências normais para o processo. Os efeitos da heterogeneidade podem ser considerados irrelevantes para efeitos de comparação, uma vez que as condições da composição da carga metálica e demais parâmetros de processo foram similares para ambas às condições. Os resultados são mostrados nas figuras 5.26 a 5.29.

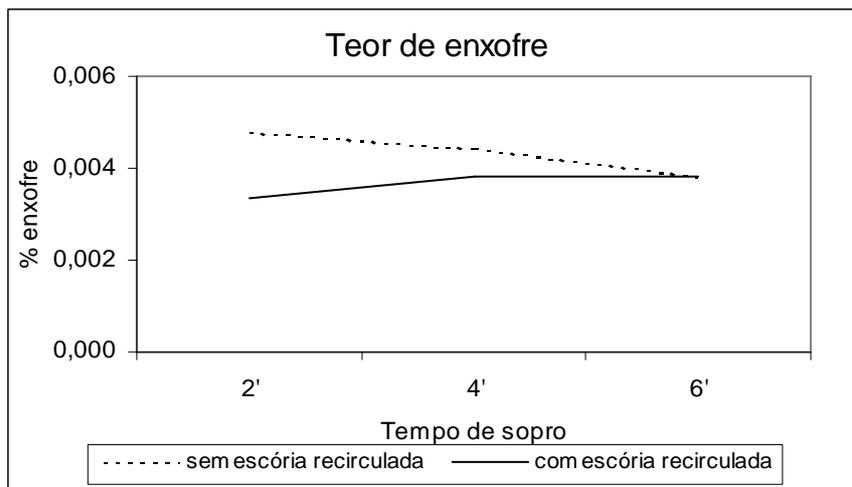


Figura 5.26 -Teor de enxofre no banho

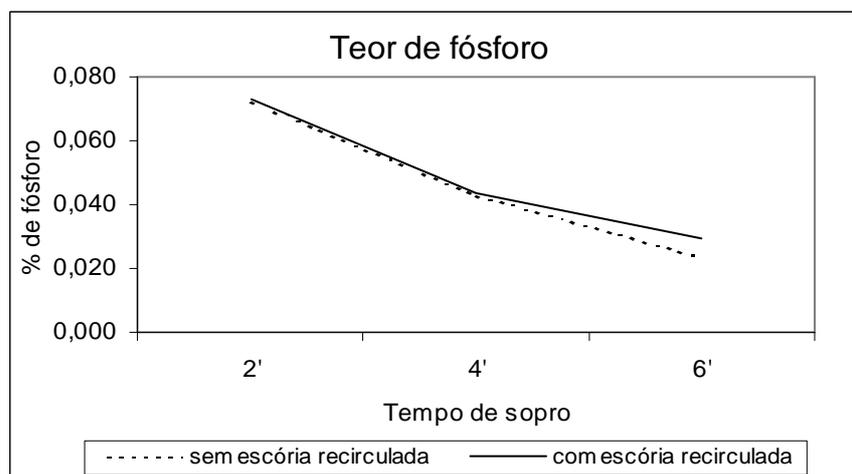


Figura 5.27 -Teor de fósforo no banho

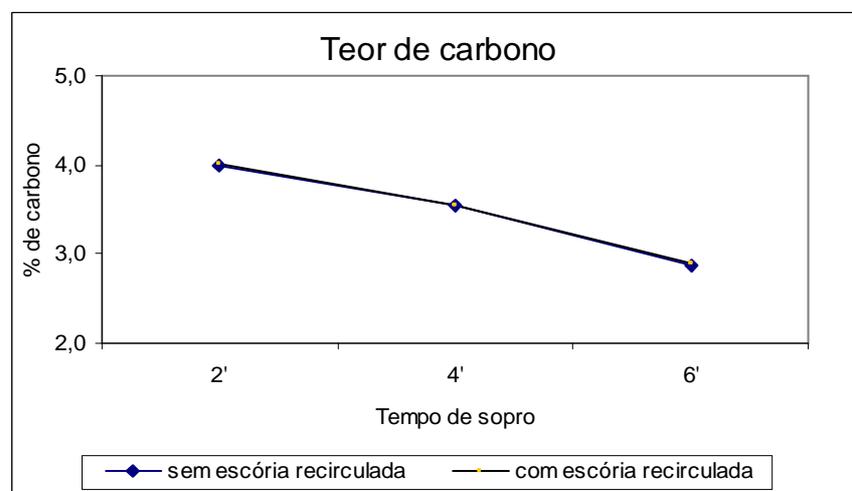


Figura 5.28 -Teor de carbono do banho

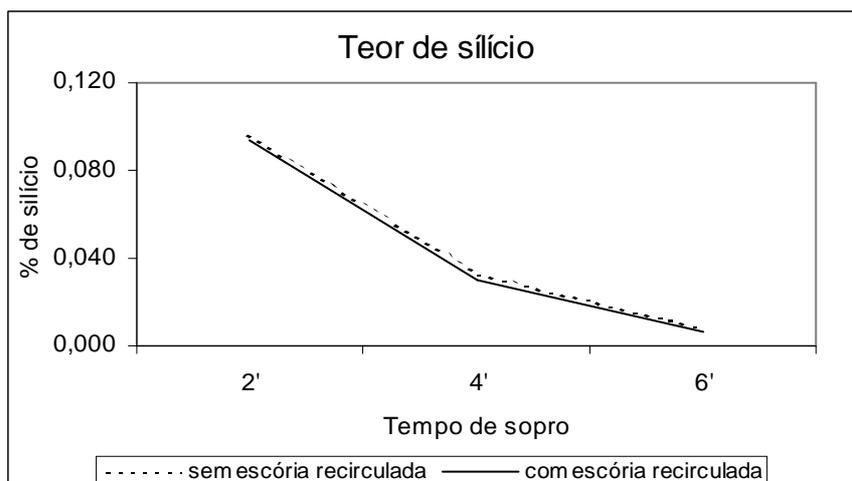


Figura 5.29-Teor de silício do banho

5.3.2.10 Análise estatística dos resultados

Para uma melhor precisão das conclusões, foi realizada análise estatística do banco de dados gerado nos experimentos. As ferramentas utilizadas para essa análise foram o teste “t” de Student e o teste de Mann-Whitney.

Embora as conclusões obtidas através das análises dos gráficos das médias pudessem explicar os resultados obtidos nas duas fases, o teste “t” mostrou também que as diferenças entre as médias são confirmadas estatisticamente. Como pode ser observado, o valor de “P value”, foi menor que 15%, nível de significância adotado para os testes, confirmando que os teores de CaO, FeO e P_2O_5 da condição “B” é realmente maior do que os valores da condição “A”. O mesmo ocorre para o caso do CaO livre que teve como hipótese, que o teor de CaO livre da condição “A” é maior do que o valor obtido na condição “B”. Uma pequena divergência pode ser observada para o caso do FeO cujo valor de “P value” maior que 15%. Como o FeO é um óxido muito instável no processo LD, principalmente nas condições em que foram realizadas os experimentos, pode ser que alguma outra variável de ruído, como o momento e condições da amostragem, tenha influenciado na análise. A tabela V.10 mostra os valores de “P value” obtidos para cada óxido com as respectivas hipóteses formuladas.

Tabela V.10 - Análise estatística com o teste "t"

Análise estatística (teste "t") "P value" para as hipóteses: H ₀ : Média da Cond. A = Média da Condição " B" H ₁ : Média da Condição "A" < Média da Condição " B"			
Óxido	Momentos de sopro		
	2 min	4 min	6 min
FeO	0,214	0,215	0,400
CaO	0,248	0,160	0,048
P ₂ O ₅	0,115	0,177	0,084
Análise estatística (teste "t") "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Média da Condição "A" = Média da Condição "B" H ₁ : Média da Condição "A" > Média da Condição " B"			
CaO livre	0,493	0,120	0,129

Como o número de amostras foi um pouco inferior ao exigido para a realização do teste "t", foi realizado também o teste de Mann-Whitney não paramétrico, para uma maior confiabilidade da análise. Como pode ser observado na tabela V.11 os resultados confirmaram as conclusões anteriores.

Tabela V.11 - Análise estatística teste Mann-Whitney

Análise estatística (teste Mann-Whitney) "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Mediana da Condição " A " = Mediana da Condição " B" H ₁ : Mediana da Condição "A" < Mediana da Condição " B"			
Óxido	Momentos de sopro		
	2 min	4 min	6 min
FeO	0,423	0,183	0,500
CaO	0,201	0,239	0,041
P ₂ O ₅	0,151	0,136	0,069
Análise estatística (teste Mann-Whitney) "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Mediana da Condição "A" = Mediana da Condição "B" H ₁ : Mediana da Condição "A" > Mediana da Condição " B"			
CaO livre	0,349	0,059	0,110

5.4 Validação do processo

Como já mencionado anteriormente, o foco desta fase foi à avaliação dos impactos do novo procedimento nos resultados finais do processo. Embora as informações obtidas até na fase dos experimentos confirmatórios fossem suficiente para a conclusão da pesquisa, foram realizadas algumas corridas para uma avaliação dos resultados de finais de processo. Foram elaboradas então 11 corridas, aço similar ao SAE 1010 com adição de escória recirculada (condição “B”). Os resultados foram comparados com uma seqüência do mesmo tipo de aço fabricada com os procedimentos convencionais, sem adição de escória recirculada (condição “A”). Os resultados dessa fase serão mostrados a seguir:

5.4.1 Carga metálica.

Também nessa fase foram mantidas as características da carga metálica, conforme utilizada nas fases anteriores. A composição química da sucata foi considerada a média dos valores que são utilizadas normalmente nos cálculos de rotina pela aciaria. As tabelas V.12 e V.13 mostram a composição química e peso da carga metálica para ambas às condições “A” e “B” respectivamente.

Tabela V.12 – Comp. química e peso carga metálica das corridas da condição “A”

Corrida	Gusa líquido				Sucata			
	%Si	%Mn	% P	Peso(t)	%Si	%Mn	% P	Peso(t)
82685	0,297	0,334	0,096	98,2	0,300	0,450	0,015	22,0
83523	0,286	0,396	0,084	99,0	0,300	0,450	0,015	20,2
83524	0,270	0,399	0,089	95,8	0,300	0,450	0,015	28,1
83525	0,237	0,372	0,084	93,1	0,300	0,450	0,015	30,4
83526	0,242	0,362	0,089	92,6	0,300	0,450	0,015	30,2
83527	0,292	0,427	0,091	86,6	0,300	0,450	0,015	30,2
83531	0,274	0,435	0,090	91,6	0,300	0,450	0,015	30,2
83532	0,293	0,414	0,089	90,5	0,300	0,450	0,015	30,2
84069	0,250	0,519	0,110	89,0	0,300	0,450	0,015	26,3
84070	0,242	0,503	0,108	96,7	0,300	0,450	0,015	26,1
84071	0,249	0,523	0,111	96,4	0,300	0,450	0,015	26,4
Média	0,267	0,426	0,095	93,6	0,300	0,450	0,015	27,3
Desvio	0,023	0,064	0,010	4,0	0,000	0,000	0,000	3,5

Tabela V.13 – Composição química e peso carga metálica das corridas da condição “B”

Corrida	Gusa líquido				Sucata			
	%Si	%Mn	% P	Peso(t)	%Si	%Mn	% P	Peso(t)
84348	0,309	0,440	0,101	95,5	0,300	0,450	0,015	22,2
84349	0,283	0,458	0,103	93,7	0,300	0,450	0,015	22,1
84350	0,289	0,477	0,105	104,4	0,300	0,450	0,015	22,2
84351	0,300	0,461	0,099	105,9	0,300	0,450	0,015	22,6
84352	0,298	0,464	0,100	94,0	0,300	0,450	0,015	22,2
84353	0,285	0,441	0,099	97,8	0,300	0,450	0,015	22,0
84354	0,283	0,445	0,096	88,6	0,300	0,450	0,015	22,0
84356	0,203	0,408	0,104	91,6	0,300	0,450	0,015	22,2
84358	0,233	0,470	0,102	94,7	0,300	0,450	0,015	22,3
84359	0,261	0,455	0,103	107,1	0,300	0,450	0,015	22,2
84360	0,262	0,454	0,102	105,1	0,300	0,450	0,015	22,2
Média	0,273	0,452	0,101	98,0	0,300	0,450	0,015	22,2
Desvio	0,032	0,019	0,003	6,5	0,000	0,000	0,000	0,15

5.4.2 Volume de escória

Para o cálculo da massa gerada de escória foi considerado o balanço de massa do CaO. O valor médio da massa de escória obtido para as duas condições “A” e “B” foi de 84,2 e 82,1 kg de escória por tonelada de aço líquido respectivamente. Além de ter atendido ao valor esperado, a dispersão do valor da massa obtida entre as corridas, foi considerada também dentro das faixas normalmente praticadas. Os resultados mostraram uma boa performance do modelo, que teve como uma das suas bases de cálculos, obter o volume mínimo de escória necessário para o processo. O valor objetivado pelo modelo foi de 80 kg de escória por tonelada de aço líquido. Como o modelo convencional também visa esse volume mínimo de escória, o resultado explica os valores similares obtidos para as duas condições testadas. Os dados utilizados para os cálculos e a massa de escória para as duas condições são mostrados na tabela V.15 e figura 5.30, respectivamente.

Tabela V.14 - Balanço de massa para cálculo da massa de escória

Massa de escória pelo CaO		
Materiais	"A"	"B"
Cal calcítica.	2535	1894
Cal dolomítica	2662	1824
%CaO Cal	96	96
% CaO dol	51	51
Rend. CaO	95	95
Total CaO	3600	2610
% CaO esc	40,8	42,5
Massa esc.	8828	6134
Escória recirculada	0	2367
Total esc	8828	8502
Esc(kg/t)	83,0	78,3

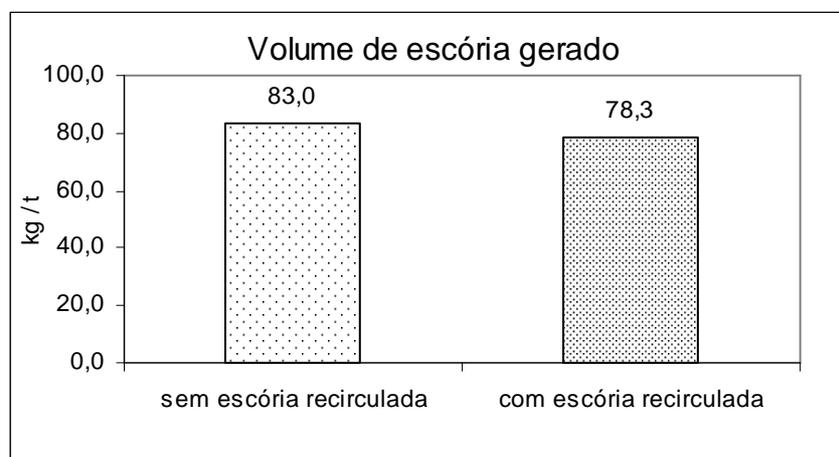


Figura 5.30 – Volume de escória gerado

5.4.3 Análise dos resultados de fim de sopro

Conforme prevista para essa fase, foram consideradas para comparação as seguintes variáveis respostas: consumo de fundentes, teor de fósforo no aço líquido, tempo de sopro e a composição química da escória final de sopro.

5.4.3.1 Consumo de fundentes

A análise de viabilidade de realização do projeto já havia mostrado que, além das proposições principais da pesquisa, o consumo de fundente também poderia ser reduzido e trazer uma redução no custo direto de fabricação do aço líquido. Os resultados confirmaram essa expectativa, como pode ser observado na figura 5.31 e nas tabelas V.16 e V.17 que mostram o consumo de cal calcítica e dolomítica para cada corrida das duas condições. Para as corridas elaboradas sem adição de escória recirculada (condição “A”), as adições foram calculadas pelo modelo convencional, seguindo, portanto os procedimentos de rotina. Para as corridas com adição de escória recirculada (condição “B”), as adições foram calculadas pelo modelo desenvolvido para os experimentos. No caso do minério de ferro para o fechamento do balanço térmico, foi calculado pelo modelo convencional para ambas as condições do experimento.

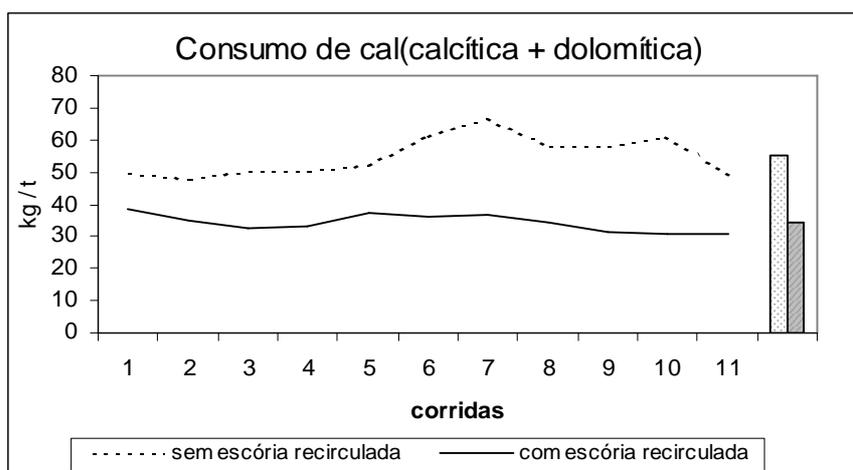


Figura 5.31- Consumo de cal (calcítica + dolomítica)

Tabela V.15- Consumo específico de fundentes das corridas da condição “A” em kg/t.

Corrida	Cal calcítica.	Cal dolomítica.	Minério de ferro	Escória. recirculada.
82685	24,5	25,0	20,1	0,0
83523	25,3	22,5	24,2	0,0
83524	24,8	25,5	4,6	0,0
83525	24,8	25,4	0,0	0,0
83526	26,2	26,0	0,0	0,0
83527	28,0	32,9	0,0	0,0
83531	31,3	35,4	2,5	0,0
83532	29,8	28,3	0,0	0,0
84069	25,8	32,2	7,8	0,0
84070	18,4	42,6	7,6	0,0
84071	23,9	25,1	8,5	0,0
Média	25,7	29,2	6,9	0,0
Desvio	3,4	6,0	8,3	0,0

Tabela V.16 - Consumo específico de fundentes das corridas da condição “B” em kg/t.

Corrida	Cal calcítica	Cal dolomítica	Minério de ferro	Escória. recirculada.
84348	19,3	19,0	10,0	15,5
84349	17,5	17,3	13,8	20,4
84350	16,5	16,3	9,6	19,0
84351	16,7	16,5	12,0	18,5
84352	18,7	18,5	10,4	17,3
84353	18,1	17,8	21,6	20,4
84354	18,6	18,3	20,2	20,2
84356	17,3	17,1	17,0	32,5
84358	15,7	15,6	20,2	29,6
84359	16,6	14,5	19,6	22,3
84360	16,8	14,3	19,1	25,3
Média	17,4	16,8	15,8	21,9
Desvio	1,1	1,6	4,7	5,2

5.4.3.2 Teor de fósforo fim de sopro

Essa variável representou para o experimento uma das mais importantes, uma vez que, a taxa de desfosforação depende fundamentalmente das características físicas, químicas e volume da escória. Além do valor absoluto do teor de fósforo obtido na condição "A" ter sido ligeiramente superior ao da condição "B", os cálculos mostraram que o valor da partição do fósforo foi também melhor para a condição "B". Esse fato assegura que a condição "B" não interferiu negativamente para processo no que se refere à capacidade de desfosforação, apresentando até uma ligeira melhora sobre a condição "A". Os dados referentes ao balanço, a partição e o teor de fósforo fim de sopro são mostrados na tabela V.18 e figuras 5.32 e 5.33

Tabela V.17 - Balanço do fósforo

Fonte de fósforo	"A"	"B"
Massa de P no Gusa líquido (kg)	88,59	99,84
Massa de P na Cal calcítica (kg)	1,64	1,4
Massa de P na Cal dolomítica (kg)	0,93	0,55
Massa de P na Sucata (kg)	4,1	3,34
Massa de P total (kg)	95,26	105,13
Massa de P no Aço (FDS) (kg)	12,35	12,28
Massa de P na escória (kg)	82,91	92,85
Massa P ₂ O ₅ na esc. recirculada (kg).	0,0	31,2
Massa de P ₂ O ₅ gerado (kg)	190,0	244,0
% P ₂ O ₅ na escória	1,27	1,31
% P na escória FDS	0,55	0,57
% P no aço (FDS)	0,012	0,011
Partição do P (%Pesc. / %Paço)	46	52

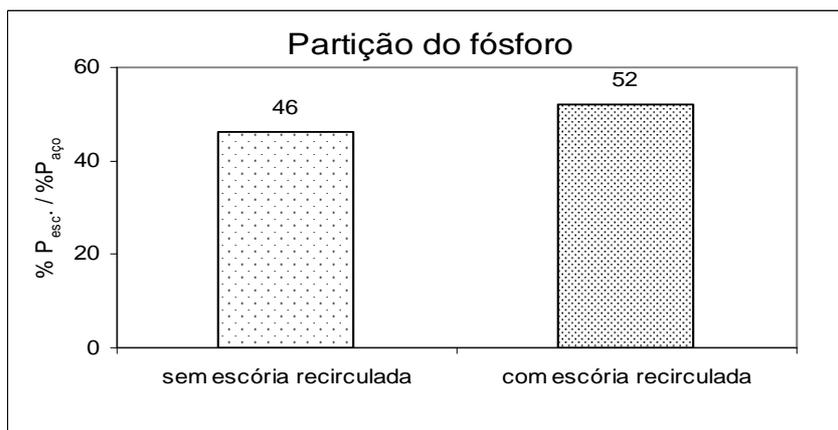


Figura 5.32 - Partição do fósforo

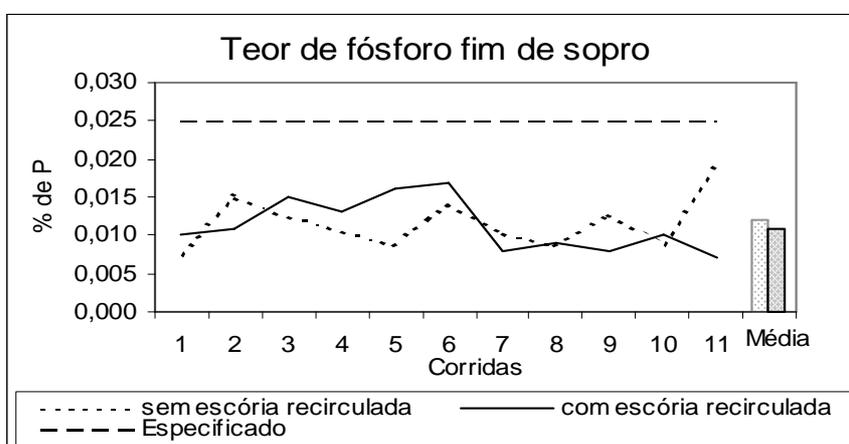


Figura 5.33 - Teor de fósforo fim de sopro

5.4.3.3 Tempo de sopro

Embora não haver razões técnicas para uma possível interferência no tempo de sopro com as mudanças propostas nos experimentos, pela importância que representa essa variável em termos de produtividade, a mesma foi também objeto de análise. Os resultados mostraram também que não houve impacto negativo para o tempo de sopro, como pode ser observado na figura 5.34.

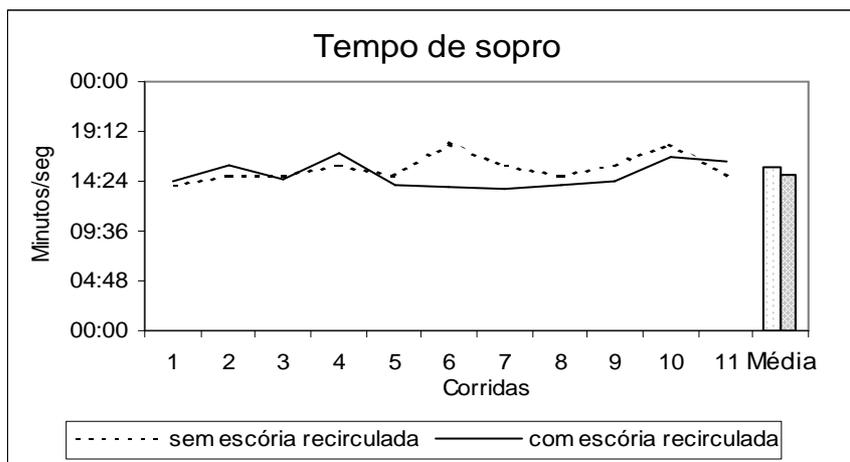


Figura 5.34 - Tempo de sopro

5.4.3.4 Composição química da escória fim de sopro

A composição química da escória fim de sopro para condição “B” manteve valores dentro da faixa esperada. Outro resultado importante foi a dispersão que também atendeu aos níveis normalmente conseguidos pelo processo convencional (condição “A”). Esses resultados podem ser considerados um dos mais significantes da pesquisa, uma vez que, eles que houve participação da participação da escória recirculada no processo conforme esperado. A média e desvio padrão da composição química das escórias obtidas nas condições “A” e “B” estão na tabela V.14 e figura 5.35.

Tabela V.18 - Composição química da escória fim de sopro.

Condição	n	Média/desvio	%SiO ₂	%FeO	%MnO	%P ₂ O ₅	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%Bas
"A"	11	Média	10,4	33,1	4,7	1,3	1,8	40,8	7,9	3,9
		Desvio	0,9	3,0	0,5	0,0	0,6	1,6	0,4	0,4
"B"	11	Média	11,6	29,6	5,1	1,3	1,7	42,5	8,2	3,7
		Desvio	1,4	6,3	0,5	0,1	0,3	3,6	1,3	0,6

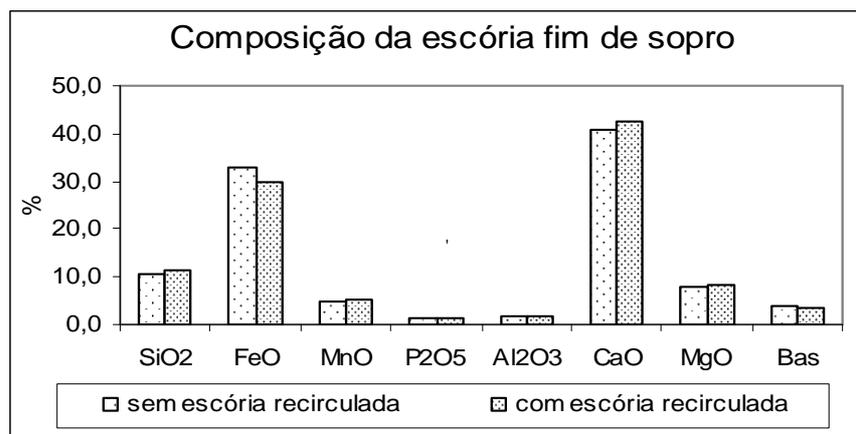


Figura 5.35 - Composição química da escória fim de sopro

5.4.4 Análise estatística dos resultados

Da mesma forma em que foi analisado o banco de dados na fase dos experimentos confirmatórios, foi realizada a análise estatística para avaliar também os resultados de processo obtidos no final de sopro. As hipóteses formuladas foram considerando que, os valores obtidos para as variáveis consumo de fundentes, tempo de sopro e teor de fósforo fim de sopro, para condição “A” onde foram adotados os procedimentos convencionais, foram maiores do que os valores obtidos para a condição “B”, onde as corridas foram fabricadas com adição de escória recirculada. Como para o teor de fósforo, o valor de “P value”, não confirmou estatisticamente que o valor obtido para condição “A” (0,012%), é superior ao valor obtido para a condição “B”(0,011%), foi feita a análise do teor de P₂O₅ na escória. Para isso foi considerada a hipótese de que o percentual de P₂O₅ para a condição “A” foi menor do que o obtido para a condição “B”. O valor de “P value” obtido para essa condição indica que essa afirmação está correta. Considerando que pelo balanço do fósforo, entrou 10,36% a mais de fósforo na carga para a condição “B”, pode-se concluir que a escória dessa condição apresentou características favoráveis para que houvesse uma melhor desfosforação. A análise estatística foi feita também pelo teste de “Mann Whitney para uma melhor confiabilidade dos resultados. Os dados referentes aos dois métodos são mostrados nas tabelas V.19 e V.20”.

Tabela V.19 – Resultado do teste de “t”

Análise estatística (teste "t") "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Média da Cond. A = Média da Condição " B" H ₁ : Média da Condição "A" > Média da Condição " B"	
Variável resposta	Valor de "P Value"
Cal calcítica(kg/t)	0,00
Cal dolomítica(kg/t)	0,00
Tempo de sopro(min)	0,09
%P fim de sopro	0,68
Análise estatística (teste "t") "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Média da Condição "A" = Média da Condição "B" H ₁ : Média da Condição "A" < Média da Condição " B"	
%P2O5 na escória	0,14

Tabela V.20 - Resultado do teste Mann-Whitney

Análise estatística (teste Mann-Whitney) "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Mediana da Condição " A " = Mediana da Condição " B " H ₁ : Mediana da Condição "A" > Mediana da Condição " B "	
Variável resposta	Valor de "P Value"
Cal calcítica(kg/t)	0,00
Cal dolomítica(kg/t)	0,00
Tempo de sopro(min)	0,09
%P fim de sopro	0,74
Análise estatística (teste Mann-Whitney) "P Value" para as hipóteses: H ₀ : Mediana da Condição "A" = Mediana da Condição "B" H ₁ : Mediana da Condição "A" < Mediana da Condição " B"	
%P2O5 na escória	0,14

5.4.5 Ganhos potenciais

Conforme mostraram os resultados obtidos nos experimentos, existem ganhos significativos, tanto para a aciaria como também para a área do Alto-forno, caso a aciaria da Belgo-Usina de Monlevade venha implantar a substituição de parte da cal utilizada no processo LD pela escória recirculada. Conforme resultados já obtidos internamente, a operação do Alto-forno visando teor de silício mais baixo no gusa líquido, além de maior estabilidade operacional que resulta em ganhos de produção, existem também ganhos diretos do custo operacional através da redução do consumo de coque. É importante lembrar que esse procedimento contribui para a viabilização das ações que vem sendo implementadas pela equipe do Alto-forno no sentido de visar teor mais baixo de silício no gusa líquido. Existem também outros ganhos indiretos tanto na aciaria como no alto forno.

5.4.5.1 Ganhos indiretos:

- Menor complexidade e dependência de fornecimento externo;
- Menor geração de finos de cal. Ganhos em meio ambiente e transporte para o descarte dos finos;
- Estocagem: menos degradação. A escória é menos perecível em relação a cal;
- Menor perda de ferro na escória. Ganho em rendimento metálico;
- Redução de pó na água de lavagem. Melhor qualidade e redução de custo com tratamento da água de lavagem de gás;
- Menor aderência de cascão na lança de oxigênio;
- Redução no consumo de fluorita
- Melhora da performance do modelo de sopro
- Maior estabilidade térmica do alto-forno
- Ganho de produção de gusa pela maior estabilidade operacional do alto-forno
- Redução da variabilidade do silício (melhor Cpk) que significa maior estabilidade do processo da aciaria;
- Redução na geração de resíduos descartáveis

5.4.5.2 Ganhos indiretos:

- Redução do consumo de coque no alto-forno
- Redução do consumo de fundentes na aciaria.

Estudos realizados pela Usina de Sidmar na Bélgica, apontam ganhos de até 1,85 kg/t no coke-rate para cada 0,100% de redução do teor de silício do gusa líquido. Conforme estudo em fase final que está sendo realizado pela equipe do alto-forno da Belgo-Usina de Monlevade, uma redução de 0,05% no teor de silício do gusa líquido será possível a curto prazo. Conforme resultados já obtidos em Usina do mesmo grupo, esse valor corresponde a uma redução de 1kg/t no coque-rate que trará uma redução direta no custo de aproximadamente de R\$1065.000,00/ano.

Para o consumo de fundentes na aciaria, considerando o ritmo de produção de 1300.000 t/ano e sendo adotado o novo procedimento para 60% dessa produção, os ganhos seriam de R\$858.000/ano para uma redução no consumo de fundentes baseada na média conseguida nos experimentos. Os dados utilizados para o cálculo do ganho são mostrados na tabela V.21.

Tabela V.21 Ganhos potenciais diretos com redução de consumo de fundentes na aciaria.

Produção anual (t)	1.300.000
% da produção com escória recirculada	60
Redução cal calcítica (kg/t)	5,48
Redução cal dolomítica (kg/t)	7,47
Consumo de esc. recirculada (kg/t)	18,14
Preço cal calcítica (R\$/t)	142,6
Preço cal dolomítica (R\$/t)	127,79
Preço estimada esc. recirculada (R\$/t)	35,07*
Ganho total direto anual na aciaria (R\$)	858000,00

*Obs.: O custo da escória recirculada foi calculado com base no custo atual de beneficiamento da sucata de aço gerada na aciaria (base janeiro/2005). Embora o custo de beneficiamento da escória recirculada deva ficar muito próximo ou até menor

ao considerado nesses cálculos, os valores apresentados devem ser considerados aproximados.

6 CONCLUSÕES

Com relação a utilização de escória recirculada na aciaria da Belgo-Usina de Monlevade substituindo parte da cal, quando se utiliza gusa líquido com baixo teor de silício podemos concluir:

- O beneficiamento da escória conforme especificação foi uma etapa importante para o sucesso da pesquisa. O baixo teor de umidade é uma característica importante que deve ser considerada. Além de fonte de hidrogênio, a presença de umidade dificulta o escoamento da escória nos silos.
- Para a implantação da utilização da escória em escala industrial, faz-se necessário incluir no planejamento, uma estação de beneficiamento de escória para manter as características e especificações utilizadas nos experimentos.
- O poder refrigerante da escória recirculada é similar ao dos materiais substituídos, podendo, portanto ser desprezado para fins do balanço térmico.
- A operação de amostragem com o basculamento do convertedor mostrou ser um ponto vulnerável. A padronização dessas atividades foi importante para obtenção de resultados confiáveis. Por outro lado, a possibilidade de se poder avaliar e comparar o estado físico da escória para os diferentes momentos do sopro, contribuiu de maneira significativa para as conclusões finais.
- A padronização da carga metálica foi fundamental para a performance do modelo de cálculo das adições e conseqüentemente para os resultados finais.
- A evolução da composição química do banho metálico nos diferentes momentos de sopro, mostrou resultados muito similares entre as duas diferentes condições experimentadas. Essa evidência foi importante para a garantia da não existência de possíveis efeitos colaterais trazidos pela adição da escória recirculada.

- A composição química da escória de final de sopro na fase de validação do processo, mostrou que não houve alteração dos valores normalmente obtidos pelo processo convencional.
- Os resultados da massa de escória gerada, além de ter atendido ao valor esperado, foi bastante similar para as duas condições do experimento. Esse fato comprovou a boa performance do modelo elaborado para os cálculos das adições.
- A capacidade de desfosforação da escória calculada pela partição do fósforo atendeu ao esperado, sendo ligeiramente superior para as corridas onde foi usada a escória recirculada. Essa conclusão pode ser reforçada pelos valores do teor de fósforo obtido no final de sopro para as duas condições do experimento.
- Não foi percebido nenhum possível efeito negativo ao processo em função da adição da escória recirculada.
- O projeto mostrou além de outros resultados positivos, uma significativa redução no consumo de fundentes, que representa uma redução do custo direto, tanto para a elaboração do aço líquido como também para o gusa líquido. A consideração desses resultados irá contribuir para a viabilização financeira na decisão da implantação do novo procedimento em escala industrial.
- Outro resultado que pode ser considerado relevante é com relação ao meio ambiente. Considerando a utilização da escória recirculada em 60% da produção de aço líquido, a usina deixará de descartar em torno de 10000 t/ano de resíduos.
- Finalmente pode-se concluir que: os resultados da pesquisa mostraram que é tecnicamente e financeiramente viável a utilização da escória recirculada da própria aciaria LD, substituindo parte da cal calcítica e dolomítica quando se utiliza gusa líquido com baixo teor de silício.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Apresentação da proposta para utilização da escória recirculada em escala industrial, incluindo a operação de beneficiamento da escória da aciaria.
- Apesar de não ter sido observado aderência de cascão na lança de oxigênio e na borda do convertedor nas corridas elaboradas com adição de escória recirculada, deve-se prever uma avaliação melhor dessa variável envolvendo um número maior de corridas.
- Estudo com foco na otimização dos limites da faixa de silício e quantidade de escória recirculada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S. L. Análise da desfosforação no refino LD. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1979. 166p. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica.
- CAMPOS, V. F. Tecnologia de fabricação do aço líquido. Belo Horizonte: UFMG, 1980. Volume 1. Vol. 1, p 77-114.
- CASTRO, L. F. A. e SAMPAIO R. S. E TAVARES R. P. Termodinâmica Metalúrgica. Vol. 1, p 456-487. Belo Horizonte: UFMG, julho 1996.
- CONOVER W. J. "Practical Nonparametric Statistics." Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- COTTAGE, D. P. et al. A New flux charge model to optimize B.O.F operating performance when using low silicon hot metal. Steelmaking Conference proceedings. 1995, p 205-214.
- DONAYO, R. 14^a IAS Steelmaking Conference. San Nigolas, Argentina, 2003.
- G.W. HEALY.. A new look at phosphorus distribution, (journal of The Iron and Steel Institute july 1970, p 664-668.
- OLIVEIRA, S. P.. Curso de Diagramas de Fase Aplicados à Siderurgia. Curso fechado para CSBM. Monlevade. Agosto / Setembro de 2004.
- PADERIN S. N., A. M. EMEL YANENKO, AND ZHUKHOVITSON A. A. Theory of slags. Steel in the ussr, vol 15 January 1985.
- THORNTON, G., ANDERSON, D. Low phosphorus basic oxygen steelmaking practices in British Steel. Source: Ironmaking and Steelmaking, v 25, nº3, 1998, p 233-238. ISSN: 0301-9233 CODEN: IMKSB7 .Publisher: inst of materials.
- VILLARREAL, R. R. et al. Dephosphorization in converter. Source: Steelmaking Conference Proceedings, 1996, p 173-175. ISSN: 0731-7735 CODEN: STCPDH Conference: Proceedings of the 1996 79th Steelmaking Conference, Mar 24-27 1996, Pittsburgh, PA, USA Sponsor: Iron & Steel Society. Publisher: Iron & Steel Soc of AIME

Anexo1 - Memória de cálculo do modelo de adição.

Quantidade de escória recirculada a ser adicionada:

$$A = B - C ; \text{ onde: (4.1)}$$

- A = Massa de escória recirculada a ser adicionada (kg)
- B = Massa de escória para atender ao volume mínimo necessário de escória (kg)
- C = Massa de escória mínima gerada com adição de cal para a neutralização da sílica conforme basicidade visada e remoção do fósforo.

Massa de cal dolomítica a ser adicionada:

$$A = \frac{(B \times C) / 100}{(D \times E) / 10000} ; \text{ onde (4.2)}$$

- A = Massa de cal dolomítica (kg)
- B = Massa de escória necessária conforme item “C” da equação 4.1 (kg)
- C = Teor de MgO final visado na escória (%)
- D = Teor de MgO na cal dolomítica (%)
- E = Rendimento do MgO no processo (%)

Massa de cal calcítica a ser adicionada:

$$A = \frac{(B - C) * D / 100}{(E * F) * 10000} ; \text{ onde (4.3)}$$

- A = Massa de cal calcítica a ser adicionada (kg)
- B = Massa de escória conforme item “C” da equação 4.1 (kg)
- C = Massa de escória gerada pela cal dolomítica adicionada (kg)
- D = Teor de CaO médio da escória de fim de sopro (%)
- E = Teor de CaO da cal calcítica (%)

- F = Rendimento do CaO no processo (%)

Massa de escória líquida em um determinado momento de sopro:

$$A = (B - C) \div D * 100; \text{ onde: (4.4)}$$

- A = Massa de escória líquida (kg)
- B = Massa total de sílica no sistema (kg)
- C = Massa de sílica que falta para formar (kg)
- D = Teor de sílica na escória em um determinado momento do sopro (%)

Porcentagem de cal dissolvida em um determinado momento do sopro:

$$A = \frac{B * C}{B}; \text{ onde: (4.5)}$$

- A = Porcentagem de escória dissolvida até a um determinado momento do sopro (%)
- B = Massa total de CaO enfiada efetiva no processo (kg)
- C = Teor de CaO na escória em um determinado momento do sopro (%)

Ob.: Os cálculos das adições de fundentes previstas no modelo sem adição de escória recirculada, são feitos através do balanço de massa, visando a massa de escória mínima necessária e o teor de MgO final conforme valores pré-estabelecidos para cada caso.