

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

Dissertação de Mestrado

**Desenvolvimento do Processo de Sopros com Lança de 3 furos no
Convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil**

Autor: Rafael Porto de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte, março 2011

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

Rafael Porto de Oliveira

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOPRO COM LANÇA DE 3 FUROS NO
CONVERTEDOR AOD-L DA ARCELORMITTAL INOX BRASIL

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

Área de concentração: Metalurgia Extrativa
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2011

Aos meus pais Luiz Fernando e Maria Aparecida,
pelo incentivo e apoio aos estudos, ao meu irmão
Renato pelo exemplo de determinação e a minha
namorada Ava pelo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada agradeço a Deus por ter me iluminado e me direcionado a tomar decisões na escolha de caminhos que tem me proporcionado muito aprendizado, crescimento pessoal e profissional.

Agradeço também com muito louvor ao gerente da aciaria Max Damazio pela confiança, oportunidades concedidas e pelo grande ensinamento em gestão.

Aos colegas da gerência de convertedores, Maurício Coelho, Bruno Cordeiro, José Antônio Farias, Manoel Abelard, Humberto Barcelos e a todos operadores pelas experiências compartilhadas.

Aos colegas da aciaria Rogério Carvalho, Robson Machado, Hélio Loss, Cleber Tinti, José do Carmo, Hebert, Santa Arthuso pelo apoio no dia a dia através do trabalho em equipe.

Aos colegas do departamento de metalurgia de inox, Alexandre Serrano, Francisco Manoel, Décio Sartori, Daniel Coimbra, Joilson Moreira, pessoas que muito contribuíram para o meu aprendizado inicial na ArcelorMittal Inox Brasil.

Ao ilustríssimo Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro pessoa a qual admiro desde o início de minha vida acadêmica no curso de graduação em engenharia metalúrgica.

Ao professor Roberto Parreiras e Clenice Galinari pela disponibilidade e apoio na conclusão deste trabalho.

Aos funcionários do DEMET, Cida e Nelson pelo apoio no decorrer do mestrado.

A minha família pelo apoio, acolhimento, orientação nos momentos difíceis e incentivo durante minha vida acadêmica e profissional.

A minha namorada Ava Cristina pelo incentivo, ensinamentos e compreensão durante as decisões tomadas em minha vida pessoal e profissional.

A empresa IMPACT pelo apoio no desenvolvimento do bico de lança utilizado neste trabalho.

Especialmente aos dirigentes e aos funcionários da ArcelorMittal Inox Brasil que por algum momento contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho: Paulo Magalhães, Clênio Guimarães, Marco Antônio Nunes, José Cordeiro, Leonardo Silvestre, Alessandro Martins, Otavio Augusto, João Domingos, Valdeci Alvarenga, Adão Adécio, supervisores e operadores da Gerência de Aciaria.

E a todos os outros que de alguma forma ajudaram e por falha ou omissão não foram citados.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	4
3.1	AÇO INOXIDÁVEL	4
3.2	PRODUÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS NA ARCELORMITTAL INOX BRASIL	6
3.3	PROCESSO AOD.....	9
3.3.1	Fases do Processo	12
3.4	- PRINCÍPIOS TEÓRICOS DA FABRICAÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL EM CONVERTEDORES AOD-L	15
3.4.1	Mecanismos de Descarburacão.....	15
3.4.2	Influência de Diferentes Variáveis no Processo de Descarburacão.....	18
3.4.2.1	Temperatura	19
3.4.2.2	Relação Oxigênio:Gás inerte	19
3.4.2.3	Composição Química.....	20
3.4.2.4	Teor de Oxigênio Dissolvido no Banho	21
3.4.3	Controle da Oxidação de Cromo	22
3.4.4	Redução da Escória de Processo.....	25
3.5	SOPRO COMBINADO EM CONVERTEDOR AOD-L	27
3.6	REFRATÁRIOS PARA CONVERTEDOR AOD.....	30
3.6.1	Mecanismos de Desgaste Refratário.....	31
3.6.2	Aplicação de Refratários em Convertedores AOD.....	32
3.7	VARIÁVEIS DE PROCESSO QUE AFETAM O DESEMPENHO REFRATÁRIO.....	35
3.7.1	Controle da Escória.....	35
3.7.2	Transferência de Escória.....	36
3.7.3	Escória de Descarburacão.....	36
3.7.4	Escória de Redução.....	37
3.7.5	Controle da Formação do “bode” nas Ventaneiras	37
3.7.6	Temperatura	38
3.7.7	Tempo de Processo	38
3.8	LANÇA DE INJEÇÃO DE OXIGÊNIO.....	39
3.9	TEORIA FLUIDO DINÂMICO DO JATO DE OXIGÊNIO.....	42
3.9.1	Comportamento do Jato no Bocal.....	42
3.9.2	Comportamento do jato fora do bocal	44
3.9.3	Interação do Jato com o Banho Metálico.....	48
3.10	PROJETO DO BOCAL DE LANÇA.....	52
3.10.1	Projeto do Bocal da Lança de 3 Furos	57

4	METODOLOGIA	59
4.1	PARTE TEÓRICA	59
4.1.1	Configuração do Bico da Lança de 3 furos.....	59
4.1.2	Definição das Variáveis Respostas	60
4.2	PARTE EXPERIMENTAL	62
4.2.1	Desenvolvimento do Plano de Experiência	62
4.2.2	Coleta e Preparação dos Dados.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
5.1.1	ROTA FEA-FEA	64
5.1.1.1	Consumo de $FeSi_{redução}/Buid-Up$	64
5.1.1.2	Tempo de processo - Charge-to-Tap (minutos).....	65
5.1.1.3	Consumo de Oxigênio (Nm^3/t)	66
5.1.1.4	Consumo de Argônio (Nm^3/t).....	67
5.1.1.5	Eficiência de Dessulfuração (%).....	68
5.1.2	ROTA FEA-PTG	69
5.1.2.1	Consumo de $FeSi_{redução}/Buid-Up$	69
5.1.2.2	Tempo de Processo - Charge-To-Tap (minutos)	70
5.1.2.3	Consumo de Oxigênio (Nm^3/t)	71
5.1.2.4	Consumo de Argônio (Nm^3/t).....	72
5.1.2.5	Eficiência de Dessulfuração (%).....	73
5.1.3	Resumo dos Resultados Experimentais Utilizando Lança de 3 e 4 Furos nas Rotas FEA-FEA e FEA-PTG.....	74
5.1.3.1	Resultado médio	74
5.1.3.2	Desvio Padrão	78
5.1.3.3	Qualidade do Produto Final	79
5.1.3.4	Desempenho Refratário	82
6	CONCLUSÕES	86
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	89
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Tipos de aços inoxidáveis (Charles, 2000) citado por (Sartori, 2009).....	5
Figura 3.2 - Rotas de produção de aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil. (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).....	9
Figura 3.3 – Desenho esquemático de um convertedor AOD-L (Marin, 2006).	11
Figura 3.4 - Processos de refino para produção de aços inoxidáveis (Marin, 2006).	12
Figura 3.5 - Fases do processo em convertedor AOD-L (Li et all, 2007).	13
Figura 3.6 - Evolução do percentual de cromo, silício, carbono e temperatura em um processo típico de refino de aço inoxidável em convertedores AOD-L (Richardson 1953) citado por (Sartori 2009).	14
Figura 3.7 - Diagrama do potencial de oxigênio (Hallsten 2007).	16
Figura 3.8 - Eficiência de remoção do carbono CRE, temperatura e carbono nas fases do processo em convertedor AOD (Hallsten 2007).....	17
Figura 3.9 - Evolução do teor de carbono, cromo e temperatura nas fases do processo do AOD-L (Hallsten 2007).	18
Figura 3.10 - Gráfico do efeito da temperatura na descarburização (Marin 2006).	19
Figura 3.11 - Gráfico do efeito da diluição do oxigênio com gás inerte na descarburização (Marin 2006).	20
Figura 3.12 - Gráfico do efeito do teor de Níquel na taxa de descarburização (Marin 2006).	21
Figura 3.13 - Gráfico do efeito do teor de Cromo na taxa de descarburização (Marin 2006).	21
Figura 3.14 - Gráfico do efeito da temperatura no percentual de oxigênio dissolvido no banho (Marin 2006).	22
Figura 3.15 - Algumas reações possíveis em um convertedor com sopro combinado (Marin 2006).	24
Figura 3.16 - Diagrama de Ellingham simplificado (Sartori 2008).	26
Figura 3.17 – Desenho esquemático da baixa penetração de gases pelas ventaneiras (a) e alta penetração de gases pelas ventaneiras (Fabritius et all 2003).....	27
Figura 3.18 – Penetração dos gases soprado pelas ventaneiras para o diâmetro das ventaneira de 2 e 3 mm e vazão de sopro de 0,020 Nm ³ /min. (pontos 1 e 4), de 0,050 Nm ³ /min. (pontos 2 e 5) e de 0,080 Nm ³ /min. (pontos 3 e 6). (a) Vista lateral, (b) Vista superior. (Fabritius et all 2003).....	28
Figura 3.19 - Efeito do sopro com lança na intensidade de agitação do banho para a simulação no modelo contendo 4 ventaneiras com ângulo de separação de 45° e vazão da lança de topo de 79,87 Nm ³ /h (a) sopro com ventaneira (b) sopro com ventaneira e lança de topo.	29
Figura 3.20 - Desenho esquemático de um convertedor AOD, destacando as diversas regiões (Choulet et all 1998).....	34
Figura 3.21 - Visão detalhada da região das ventaneiras do convertedor (Choulet et all 1998).	34
Figura 3.22 - Estimativa do percentual de cromo contido na escória em função da basicidade (Choulet et all 1998).	36
Figura 3.23 - Tipos de “bode” formados na ponta das ventaneiras (Sartori 2008).....	38

Figura 3.24 - Desenhos esquemáticos da lança, do sistema de refrigeração e do bico da lança (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).	40
Figura 3.25 - Impregnação de metal e escória na lança de injeção de oxigênio (Documento interno ArcelorMittal Inox Brasil).	41
Figura 3.26 – Desenho esquemático do sopro de oxigênio pela lança de topo no convertedor AOD-L (Sartori 2008).	41
Figura 3.27 - Pontos de referência da estrutura da lança (Martins 2008).	42
Figura 3.28 - Representação esquemática das regiões presentes ao longo do fluxo (Martins 2008).	45
Figura 3.29 - Representação esquemática das regiões no jato supersônico (Martins 2008).	46
Figura 3.30 - Relação entre o comprimento do núcleo supersônico e o número de Mach (Anderson et all 1995) citado por (Martins 2008).	46
Figura 3.31 - Pressão máxima de impacto em função do número de Mach e a distância até a ponta da lança (Flinn 1967) citada por (Martins 2008).	47
Figura 3.32 - Quadro de fotográficas do jato de ar de 94 psi (Glass 1974) citada por (Martins 2008).	48
Figura 3.33 - Deformação do banho formada pelo impacto do jato de oxigênio em convertedor (Martins 2008).	49
Figura 3.34 – Relação entre a interação do jato em relação ao número de bocais e ângulo da lança utilizado no cálculo do diâmetro equivalente dos bocais (Martins 2008).	51
Figura 3.35 - Relação entre vazão de oxigênio com a capacidade do convertedor (Anderson et all 1995) citado por (Martins 2008).	53
Figura 3.36 - Interação entre os jatos de O ₂ soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 10°, 12° e 14° respectivamente (WANG et all 2010).	54
Figura 3.37 - Mapas de velocidade dos jatos de O ₂ soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 10°, 12° e 14° respectivamente (WANG et all 2010).	55
Figura 3.38 - Mapas de velocidade dos jatos de O ₂ soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 12° e altura da lança com relação ao banho metálico de 0.8 m, 1,2 m e 1,6 m respectivamente (WANG et all 2010).	55
Figura 3.39 - Representação dos mapas de contorno da pressão dinâmica para bocal de lança contendo 4 furos e ângulo de inclinação do bocal de 10°, 15° e 20° respectivamente (Tago et all 2003).	56
Figura 3.40 - Representação dos mapas de contorno da pressão dinâmica para bocal de lança com inclinação do bocal de 20° e lança contendo a) 4 e b) 6 bocais respectivamente (Tago et all 2003).	56
Figura 3.41 – Desenho esquemático do bico da lança de 3 furos.	58
Figura 4.1- Posição de sopro da lança de 3 furos nos experimentos realizados vista superior do convertedor (a) e bocal da lança de furos (b).	62
Figura 5.1 - Box-Plot da relação do consumo de FeSi _{redução} /Buid-Up utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.	64
Figura 5.2 - Box-Plot do tempo de processo utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.	65
Figura 5.3 - Box-Plot do consumo de oxigênio (Nm ³ /t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.	66

Figura 5.4 - Box-Plot do consumo de argônio (Nm^3/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.....	67
Figura 5.5 - Box-Plot da eficiência de dessulfuração no convertedor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.....	68
Figura 5.6 - Box-Plot da relação do consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.....	69
Figura 5.7 - Box-Plot do tempo de processo utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.....	70
Figura 5.8 - Box-Plot do consumo de oxigênio (Nm^3/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.....	71
Figura 5.9 - Box-Plot do consumo de argônio (Nm^3/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.....	72
Figura 5.10 - Box-Plot da eficiência de dessulfuração no convertedor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.....	73
Figura 5.11- Variação da relação do consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.....	74
Figura 5.12 - Variação do CTT utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.....	75
Figura 5.13 - Variação do consumo de oxigênio (Nm^3/t) utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.....	76
Figura 5.14 - Variação do consumo de argônio (Nm^3/t) utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.....	77
Figura 5.15 - Eficiência de dessulfuração no convertedor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG.....	78
Figura 5.16 – Exemplo do defeito esfoliação (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).....	80
Figura 5.17 – Exemplo do defeito Lasca de Aquecimento (Documento interno ArcelorMittal Inox Brasil).	80
Figura 5.18 - Evolução do desvio e ocorrência do defeito lasca de aquecimento (a) e esfoliação (b) utilizando lança de 3 e 4 furos.	82
Figura 5.19 – Percentual de desgaste individual das ventaneira no final da campanha refratária antes do início do teste com lança de 3 furos.....	83
Figura 5.20 - Percentual de desgaste individual das ventaneira no fim da campanha refratária após início do teste com lança de 3 furos.....	84
Figura 5.21 – Evolução da vida refratária antes e após o início das experiências utilizando lança de 3 furos.	85
Figura 7.1 – Posição de sopro de oxigênio com lança de 3 furos.....	89
Figura 8.1 - Programa de sopro e fases do processo de uma corrida realizada no AOD-L..	92
Figura 8.2 - Controle da curva de descarburização e de adições de ligas controladas pelo modelo TopAOD e pela carbometria.....	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I – Resultados dos testes experimentais realizados por Li et al (2007) no convertidor AOD-L da Baosteel.	30
Tabela II – Configuração geométrica e parâmetros de trabalho da lança de 3 e 4 furos.	58
Tabela III – Tabela comparativa do desvio padrão das corridas experimentais.	79
Tabela IV - Perda térmica média para cada fase do processo	95
Tabela V - Perda térmica média para as vazões utilizadas nas fases finais do processo	95
Tabela VI - Perda térmica para cada tipo de liga adicionada	96

LISTA DE SÍMBOLOS

AOD-L - “Argon Oxigen Descarburization by Lance”

FEA - Forno elétrico a arco

PTG - Estação de pré-tratamento de gusa

VOD - “Vacum Oxigen Descarburization”

CRE - Eficiência de remoção do carbono

L - Profundidade de penetração do jato de O₂

Lo - altura do banho estático dentro do convertedor

L/Lo - relação de penetração

L_{ho} - Profundidade do banho parado (mm)

Ar - Argônio

PO₂ - Pressão parcial do oxigênio

R - Constante dos Gases (J/mol.K)

M - Mach number

V - Velocidade (cm/s)

a - Velocidade do som (cm/s)

A - área da seção transversal do duto (cm²)

ρ - Densidade (kg.m³)

Q - Vazão (Nm³/h)

Dt - Diâmetro da seção crítica (mm)

H - Altura da lança em relação ao banho (mm)

nf - Número de furos

Ø - Diâmetro do furo

CTT - Charge to Tap (Tempo de Processamento da Corrida)

Paço - Peso de aço previsto no vazamento

%Cr_{objetivado} - Objetivo de cromo do aço

%Si_{objetivado} - Objetivo de silício do aço

%Si_{FeSi} - Teor de silício na liga ferro silício

Rend. Si_{redução} - Rendimento de silício na redução do cromo

Rend. Si_{incorporação} - Rendimento de silício na incorporação

%Cr_{final} - Cromo Final (%)

Dec (1,2 e 3) - Etapas da descarburização, utilizando sopro pela lança de topo e pelas ventaneiras

Dec_{final} (1, 2 e 3) - Etapas da descarburização, utilizando somente o sopro pelas ventaneiras

RESUMO

O convertedor AOD é o principal equipamento utilizado na produção de aços inoxidáveis. O processo de produção do aço inoxidável no AOD-L ocorre através da injeção de uma mistura de oxigênio e gás inerte pelas ventaneiras e sopro de oxigênio pela lança de topo sobre o banho metálico, com o objetivo de promover a oxidação seletiva do carbono. O tempo de sopro depende do projeto do bocal da lança de topo e da vazão de oxigênio de trabalho. A interação entre o jato de oxigênio soprado pela lança de topo com os gases injetados pelas ventaneiras no banho metálico tem influência nas reações de refino, nas projeções de metal/escória e afeta diretamente os resultados metalúrgicos do processo em convertedores AOD-L.

O presente trabalho mostra os principais motivos para o experimento utilizando a lança de 3 furos no convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil em substituição à lança de 4 furos para sopro de oxigênio.

O desenvolvimento do trabalho se baseou em uma ampla pesquisa bibliográfica e experiências de outras empresas produtoras de aço inoxidável para definição e configuração do bico da lança de 3 furos utilizada nos experimentos. A lança de 3 furos teve seu ângulo de abertura e diâmetro do bocal modificados. Os experimentos foram realizados no aço inoxidável austenítico P304A nas rotas de produção (FEA-FEA) que utiliza pré metal proveniente dos fornos elétricos à arco e na rota (FEA-PTG) que utiliza pré metal proveniente dos fornos elétricos à arco e ferro-gusa tratado.

Com a utilização da lança de 3 furos houve redução da oxidação do cromo, redução do tempo de processo (CTT), redução do consumo específico de oxigênio e argônio, melhor eficiência de dessulfuração no convertedor AOD-L com melhor qualidade do produto final.

Palavras Chave: Aço inoxidável, Lança de topo, Descarburção, AOD-L

ABSTRACT

The AOD converter is the main equipment used on the stainless steels production. The production of stainless steel in AOD-L occurs through injection of a mixture of oxygen and inert gas by tuyères and blowing oxygen by one top lance on the metal bath, to promote the selective carbon oxidation. The process time depends of the nozzle design and the oxygen flow rate. The interaction between the oxygen blown by top lance and the gas injected by the tuyères has an influence on the refine reactions, on the quantity of metal/slag projections and directly affects the metallurgical process results on the AOD-L converter. This work shows the main reasons of the experiment using 3 hole lance in the AOD converter of ArcelorMittal Inox Brazil, replacing the 4-hole lance to blowing oxygen. This work was based in one biography research and the experience of others stainless steel producers to define the configuration of the 3 hole lance used in the experiments. The three holes lances had its opening angle and diameter of the nozzle modified. The experiments were performed on austenitic stainless steel P304A on the route (EAF-EAF), which uses pre metal from electric arc furnaces and on the route (EAF- PTG) that uses pre metal from the electric arc furnaces and hot metal treated. Using the 3 holes lances the chromium oxidation decreased, the AOD process time reduce, the oxygen and argon specific consumption reduce, improve AOD desulfurization efficiency with better quality of the cold- rolled strip.

Key words: Stainless Steel, Top Lance, Descarburization, AOD-L

1 INTRODUÇÃO

O convertedor AOD-L é o principal equipamento utilizado na produção do aço inoxidável. É um vaso de aço, na forma de barril, revestido com refratário em seu interior, com uma abertura na parte superior para receber a carga metálica e fundentes, utilizada também para vazamento do aço e escória formada no processo. A sigla “AOD” significa descarburização com argônio e oxigênio (A-argon, O-oxygen, D-descarburization) e como sugerido pelo próprio nome, o refino dos aços inoxidáveis ocorre através da injeção de uma mistura de oxigênio e gás inerte no banho metálico com objetivo de promover a oxidação seletiva do carbono. Alguns convertedores como na ArcelorMittal Inox Brasil, além das ventaneiras laterais possuem lança de topo para sopro complementar de oxigênio e por isso são denominados convertedor AOD-L.

Através da lança de topo é soprado oxigênio de alta pureza com velocidade supersônica sobre a superfície da carga metálica, promovendo as reações de refino e formação de escória. O sopro de oxigênio além de promover as reações químicas proporciona também agitação do banho metálico sobre as paredes refratárias do convertedor, que pode ter seu desgaste acentuado dependendo da intensidade e direção do jato de oxigênio soprado. A intensidade de agitação do banho depende do projeto do bocal da lança de topo, da vazão de gases da lança e ventaneiras e pela altura da lança durante o processo segundo os autores Bjurstrom et all (2006), Fabritius et all (2001), Fabritius et all (2003), Wei et all (2010) e Naito et all (2000).

A ArcelorMittal Inox Brasil, ainda Acesita, iniciou suas atividades em 1978 com um convertedor AOD-L de 35t e capacidade de produção anual de aços inoxidáveis de 168 mil toneladas. Em 2002, houve uma expansão na produção de aços inoxidáveis, através da aquisição de um novo convertedor AOD-L de 80t, passando a ter uma capacidade instalada anual de produção de 450 mil toneladas.

O processo de fabricação no AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil possui diferentes alternativas de produção, desde a utilização de cargas contendo sucata e ferro ligas fundidos a cargas contendo somente ferro-gusa líquido. Diante das diferentes alternativas de produção, baixa temperatura do pré-metal carregado (aproximadamente 1300 °C), alto teor de carbono no início do processo (aproximadamente 4%) e devido à grande quantidade de adições de carga sólida (Build-Up de 16 a 35%) fazem com que as condições de processo no convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil sejam únicas no mundo.

Durante o processo de sopro de oxigênio para a redução do teor de carbono, os metais cromo, manganês e ferro também são oxidados. Ao final do processo de descarburagem, é indispensável a redução dos metais oxidados que retornam para o banho metálico através da adição de agentes redutores como FeSi.

Para que o processo seja economicamente viável é essencial ter um controle rigoroso do processo de forma a otimizar o consumo de refratário, redutores, gases e fundentes que devem estar alinhados com a produtividade e rendimento das ligas carregadas durante o processo de elaboração em convertedores AOD-L.

O propósito deste trabalho é desenvolver o processo de sopro com lança de 3 furos em substituição à lança de 4 furos objetivando aumentar a produtividade do AOD-L com redução da oxidação de cromo durante o processo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é melhorar o desempenho operacional do convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil através do desenvolvimento do processo de sopro com lança de 3 furos em substituição à de 4 furos para aumento de produtividade e redução da oxidação de metais nobres.

2.1 Objetivos Específicos

- Correlacionar o processo de sopro utilizando lança de 3 furos com a oxidação de cromo no processo de produção de aço inoxidável.
- Correlacionar o processo de sopro utilizando lança de 3 furos com o tempo de processo de aços inoxidáveis no convertedor AOD-L (CTT).
- Correlacionar o processo de sopro utilizando lança de 3 furos com o desgaste individual das cinco ventaneiras instaladas na lateral do convertedor.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Aço Inoxidável

Os aços inoxidáveis fazem parte de um grupo de aços resistentes à corrosão, contendo acima de 10,5% de cromo, podendo conter uma quantidade variável de elementos de liga como níquel, molibdênio, titânio, nióbio e manganês. As propriedades mecânicas e o comportamento em trabalho dos vários tipos de aço dependem da sua composição química e da sua rota de produção na aciaria e laminação.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em grupos conforme classificação de kumagai (2001).

- Austeníticos (Série 300): contem 17-25% de cromo e 6-20% de níquel;
- Martensíticos (Série 400): contem 12-17% de cromo e 0,1 a 1,0% de carbono;
- Ferríticos (Série 400): contendo 10,5-27% de cromo e baixo teor de carbono;
- Duplex: com 23-30% de Cr, 2,5-7% de níquel e adições de titânio ou molibdênio;
- Endurecíveis por precipitação: podem ter uma base austenítica ou martensítica, com adições de Cu, Ti, Al, Mo, Nb ou N.

A Figura 3.1 descreve os tipos de aços inoxidáveis em função do cromo equivalente e níquel equivalente obtido pelas equações descritas na figura.

Ni equivalente

$$\text{Ni}\% + 0,5 \text{ Mn}\% + 0,3 \text{ Cu}\% + 30 (\text{C}\% + \text{N}\%)$$

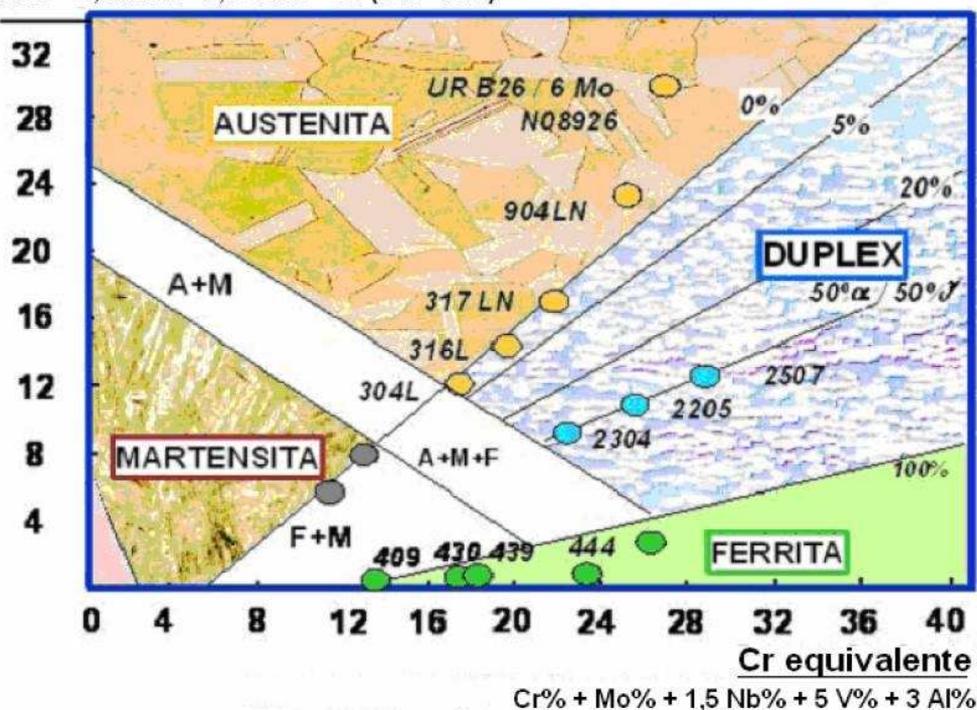


Figura 3.1 - Tipos de aços inoxidáveis (Charles, 2000) citado por (Sartori, 2009).

Os aços inoxidáveis apresentam uma grande variedade de aplicação e são utilizados principalmente em cinco tipos de mercado conforme descrito abaixo:

- Electrodomésticos: Grandes electrodomésticos e pequenos utensílios domésticos;
- Automotores: Produção de peças para veículos automotores. Ex. sistema de exaustão dos veículos;
- Construção: Edifícios e mobiliários;
- Indústria: Alimentação, produtos químicos, energia e petróleo;
- Setor de Serviços: Fachadas e placas de sinalização visual.

As principais propriedades que o distinguem dos demais materiais são:

- Resistência à corrosão;
- Boa soldabilidade;

- Alta resistência em alta e baixa temperaturas;
- Alta resistência mecânica;
- Conformação por diversos processos.

As propriedades únicas dos aços inoxidáveis fazem deles um excepcional material de construção e se diferenciam de outros materiais em diversas aplicações. Apesar de alguns julgarem o aço inoxidável como uma opção mais cara, a análise financeira não deve levar em conta somente o custo do produto, mas considerar o ciclo de vida do aço, custo de manutenção para reparo e produtividade do equipamento analisado. Feita análise completa a utilização de aço inoxidável se revela como opção mais econômica. Como exemplo, em usinas hidrelétricas, o custo de reparo e troca do rotor é muito superior ao investimento para aplicação de uma material mais nobre capaz de prolongar a vida útil do rotor. Considerando um ciclo de vida de dezenas de anos, custo alto de mão-de-obra e custo de parada de produção de energia para trocar ou reparar o rotor, o aço inoxidável se torna a opção mais econômica.

3.2 Produção de Aços Inoxidáveis na ArcelorMittal Inox Brasil

A ArcelorMittal Inox Brasil, na época Acesita, foi fundada em 31 de outubro de 1944 com o objetivo de produzir aços especiais para o abastecimento do mercado nacional. Em 1951 iniciou-se a produção de aços comuns e especiais na aciaria e, desde então a usina passou por grandes expansões até atingir a atual capacidade instalada de 900 mil toneladas/ano de placas de aço.

Atualmente o percentual de produção de aços inoxidáveis na ArcelorMittal Inox Brasil é de aproximadamente 60% da produção total, seguida dos aços siliciosos e carbono com 25% e 15% respectivamente.

As áreas que compõe a empresa e os equipamentos instalados em cada uma são descritos a seguir:

Redução: É composta por uma ampla área de pátios de matéria-prima e dois altos-fornos que produzem 1800t de ferro-gusa por dia. O alto-forno I utiliza como fonte redutora o carvão vegetal e o alto-forno II coque. Atualmente esta em execução um projeto que viabilizará a utilização de carvão vegetal no alto-forno II.

Aciaria: Com uma capacidade de produção de 900.000t de placas de aço por ano, é uma área complexa composta por vários equipamentos.

- PTG: estação de pré-tratamento de gusa que tem a capacidade de realizar operações como dessiliciação, dessulfuração e desfosforação do ferro-gusa.
- FER: forno elétrico de redução. Produz parte da liga FeCr utilizada na produção de aços inoxidáveis.
- FEA's: são dois fornos elétricos a arco, que fundem a sucata e ligas utilizadas na produção dos aços inoxidáveis.
- AOD-L: principal convertedor para a produção de aços inoxidáveis.
- MRP-L: convertedor utilizado para a produção de aços carbono, siliciosos e inoxidáveis.
- VOD's: são dois convertedores que realizam a degaseificação e descarburização sob vácuo dos aços siliciosos, carbono e inoxidáveis com baixo teor de carbono.
- FORNO PANELA: forno utilizado para fazer ajustes de temperatura e composição química dos aços siliciosos, carbono e inoxidáveis.
- LINGOTAMENTO CONTINUO: duas máquinas de lingotamento de placas de aços carbono, siliciosos e inoxidáveis.

Laminações: A ArcelorMittal Inox Brasil é composta por 1 laminação de tiras a quente e duas laminações de tiras a frio.

- LTQ: A laminação de tiras a quente produz as bobinas e chapas planas laminadas a quente. É composta por dois fornos de aquecimento, dois laminadores e uma bobinadeira.

- LTF: A laminação de tiras a frio é dividida em duas unidades sendo uma para a laminação de bobinas de aço Inoxidável e outra para a laminação de bobinas de aço silício.

Na aciaria a produção do aço inoxidável se inicia com o carregamento de ferro cromo líquido nos fornos elétricos a arco (FEA's) seguida do carregamento e fusão de sucata e ferro ligas.

O ferro-gusa produzido nos altos-fornos é dessiliciado e desfosforado nas estações de tratamento de ferro-gusa (PTG) e carregado no AOD-L em uma panela de carregamento junto com metal dos fornos elétricos a arco.

No convertedor AOD-L ocorre o processo de transformação da carga metálica líquida (pré-metal) em aço inoxidável através do sopro de oxigênio pela lança de topo e ventaneiras e adição de ligas para acerto de composição química.

O fluxo composto por metal dos fornos elétricos a arco e ferro-gusa tratado no PTG é denominado FEA-PTG. Além do fluxo FEA-PTG na ArcelorMittal Inox Brasil existe o fluxo GUSA INOX cuja carga é composta somente por gusa tratado e o fluxo FEA-FEA composto somente por metal proveniente dos fornos elétricos a arco.

No convertedor AOD-L, o aço pode ser produzido em duas diferentes rotas, denominadas “rota duplex” e “rota triplex”.

Na principal rota, “duplex”, o aço é descarburado no AOD-L e os ajustes finais de composição química e temperatura são realizados na metalurgia de panela.

Na rota “triplex”, o aço é parcialmente descarburado no AOD-L e a descarburagem final ocorre sob vácuo nos VOD's.

A Figura 3.2 ilustra esquematicamente as rotas possíveis de produção de aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil.

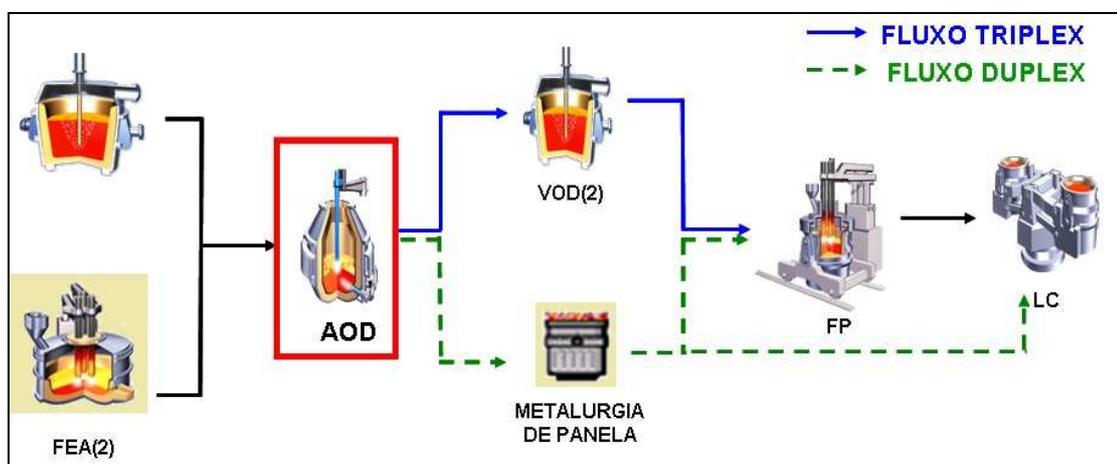


Figura 3.2 - Rotas de produção de aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil. (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).

3.3 Processo AOD

O principal objetivo do convertedor AOD é promover a oxidação seletiva do carbono sem uma excessiva oxidação de cromo. A oxidação do carbono ocorre através do sopro de oxigênio pela lança de topo e pela injeção de oxigênio e gás inerte pelas ventaneiras instaladas na lateral do convertedor.

O desenvolvimento do processo AOD se deu no início da década de 60 através de experimentos desenvolvidos e coordenados por Krivsky e descritos por Choulet (1998). O desenvolvimento e realização dos experimentos se deram no “Metals Research Laboratories” da Union Carbide, em Niagara Falls, Estados Unidos. Durante os experimentos realizados através do sopro de oxigênio sobre a superfície de um banho metálico contendo 45,4 kg de uma liga de cromo líquida foi observado grande elevação de temperatura devido às reações exotérmicas de oxidação do cromo. Em função do grande aporte térmico do banho foi adicionado argônio junto com ao oxigênio soprado objetivando um melhor controle da temperatura. Nos experimentos foi observado que a diluição promovida pelo argônio favorecia a descarburização a níveis mais baixos do que os obtidos previamente, sem uma excessiva oxidação de cromo. Os resultados experimentais obtidos e a revisão de conceitos básicos da físico-química do sistema em estudo despertaram a idéia

de desenvolver um processo de refino que proporcionasse uma descarburização mais eficiente. Muitos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento foram iniciados e em 1960, a Union Carbide e a usina de Joslyn iniciaram um programa de trabalho cooperativo para desenvolvimento de um processo mais eficiente para a produção de aço inoxidável.

Após muitas experiências, na usina de Joslyn, utilizando um forno elétrico de 15t, tornou-se evidente que o desenvolvimento de um processo prático não teria sucesso sem a utilização de um vaso de refino separado. Nos processos utilizando forno elétrico, muito CaO era adicionado para neutralizar a sílica gerada e o volume de escória desses processos ultrapassava o de metal, reduzindo a capacidade do forno. A idéia de se utilizar um vaso separado para refino foi explorada na divisão Linde da União Carbide no “Towanda Laboratories”. Após varias experiências foi montado um convertedor de 15t. contendo 3 ventaneiras laterais. Em 1967 foi produzida a primeira corrida de aço inoxidável utilizando o convertedor AOD e em 1968 entrou em operação comercial o primeiro convertedor AOD.

Os benefícios do processo AOD, tais como: “limpidez do aço”, boa capacidade de dessulfuração, alto rendimento metálico, baixo tempo de processo, facilidade operacional e flexibilidade na produção de diversos tipos de aço, fizeram com que a produção de aço via AOD crescesse de forma consistente após seu desenvolvimento no final da década de sessenta. Desde então o AOD tem se tornado o principal equipamento utilizado na produção de aço inoxidável (Marin, 2006). O AOD representou uma verdadeira revolução no processo de produção do aço inoxidável, permitindo significativa redução do custo de produção e aumento de produtividade.

A Figura 3.3 mostra um convertedor AOD-L já com a evolução de utilização de lança de topo para aumentar a taxa de descarburização e conseqüente produtividade do processo.

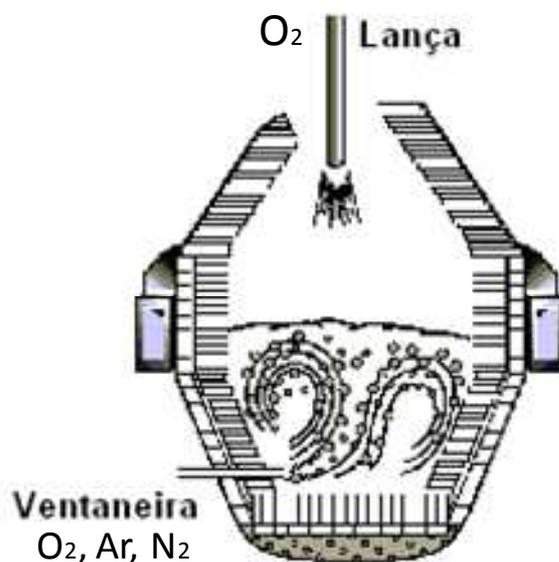


Figura 3.3 – Desenho esquemático de um convertedor AOD-L (Marin, 2006).

Após o desenvolvimento do processo AOD outros processos que utilizam o princípio de diluição do gás CO foram desenvolvidos e novos processos de fabricação de aço inoxidável foram criados, porém, a vanguarda de produção de aço inoxidável em convertedores AOD se manteve. A Figura 3.4 apresenta os processos mais utilizados na produção de aço inoxidável em escala industrial.

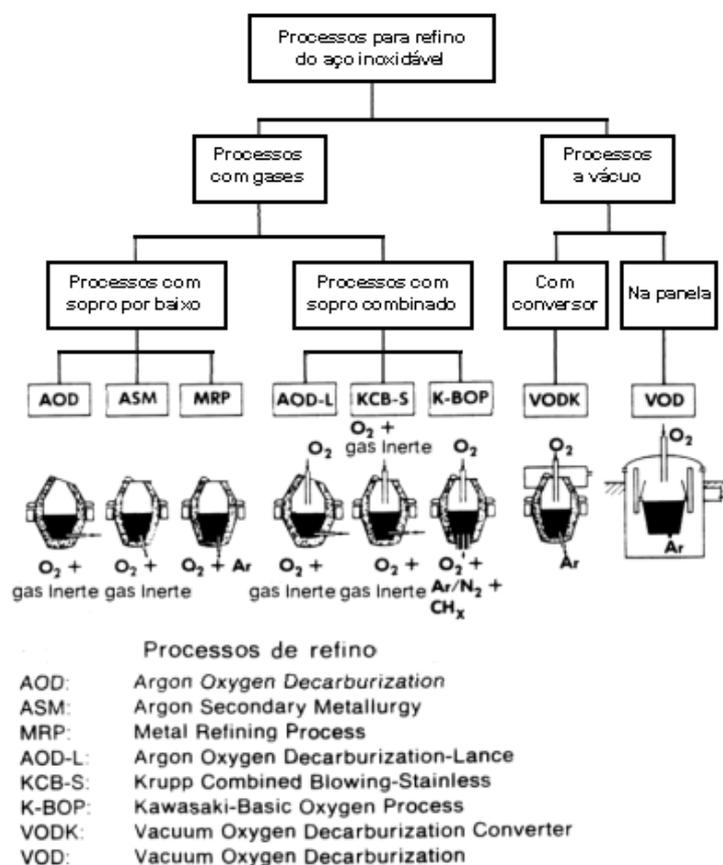


Figura 3.4 - Processos de refino para produção de aços inoxidáveis (Marin, 2006).

3.3.1 Fases do Processo

O processo de refino em convertedor AOD é dividido em fases, com o objetivo de maximizar a eficiência da descarburização e reduzir a oxidação de cromo. As fases são caracterizadas pela vazão dos gases soprados pelas ventaneiras e lança de topo e pelas matérias-primas adicionadas (Ver Anexo 1).

A fase inicial denominada homogeneização consiste em um sopro de gás inerte pelas ventaneiras, tendo como finalidade, garantir a homogeneização térmica e química do metal líquido carregado no AOD.

Em seguida inicia-se a descarburaco em um processo dividido em 2 fases, sopro combinado que utiliza a lança de topo e as ventaneiras para sopro de oxigênio e o sopro que utiliza somente as ventaneiras para sopro de oxigênio e gás inerte como ilustrado na Figura 3.5. O sopro pelas ventaneiras inicia-se com altas vazões de oxigênio e baixas vazões de argônio e  medida que o carbono  oxidado, as vazões de oxigênio diminuem e as vazões de gás inerte aumentam de forma a garantir a oxidao seletiva do carbono com menor oxidao dos metais.

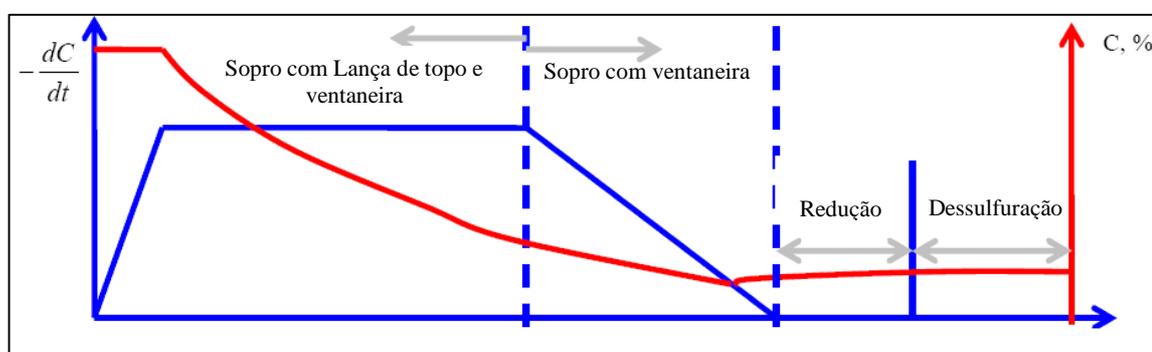


Figura 3.5 - Fases do processo em convertedor AOD-L (Li et all, 2007).

Após a etapa de descarburaco  realizada a reduo dos metais oxidados. Esta fase  denominada reduo e tem como objetivo recuperar os metais oxidados durante o processo de descarburaco. A fase de reduo  realizada através da adio de elementos químicos redutores, silício ou alumínio, e pelo sopro de argônio pelas ventaneiras para agitao do banho. Nesta etapa do processo ocorre também a remoo de nitrogênio e enxofre do banho metálico.

Além das fases descritas, as fases de resopro e resfriamento com gás inerte auxiliam no processamento das corridas no AOD-L, principalmente para controle da temperatura e carbono final de sopro.

Segundo Sartori (2009) um processo típico de refino em convertedores AOD-L inicia-se com o carregamento de um metal líquido contendo cerca de 2% de carbono, 18% de cromo,

0.3% de silício e temperatura de aproximadamente 1500°C. Em seguida, ocorre a injeção de oxigênio e gás inerte no banho metálico que participam das reações de oxidação do silício, carbono e cromo, simultaneamente. Estas reações elevam a temperatura do metal líquido e reduzem a quantidade destes elementos no banho. Quando o teor de carbono no banho atinge o valor especificado, é realizada a recuperação do cromo oxidado, através da adição de ferro silício ou alumínio. A presença de silício no banho e a agitação na interface metal-escória promovem as reações de recuperação do cromo oxidado, fazendo com que o teor de cromo do banho aumente e o teor de silício diminua. Nesta etapa, denominada redução, a agitação do banho e as reações de recuperação do cromo fazem a temperatura do banho diminuir e o teor de silício oxidado aumentar, conforme mostra a Figura 3.6.

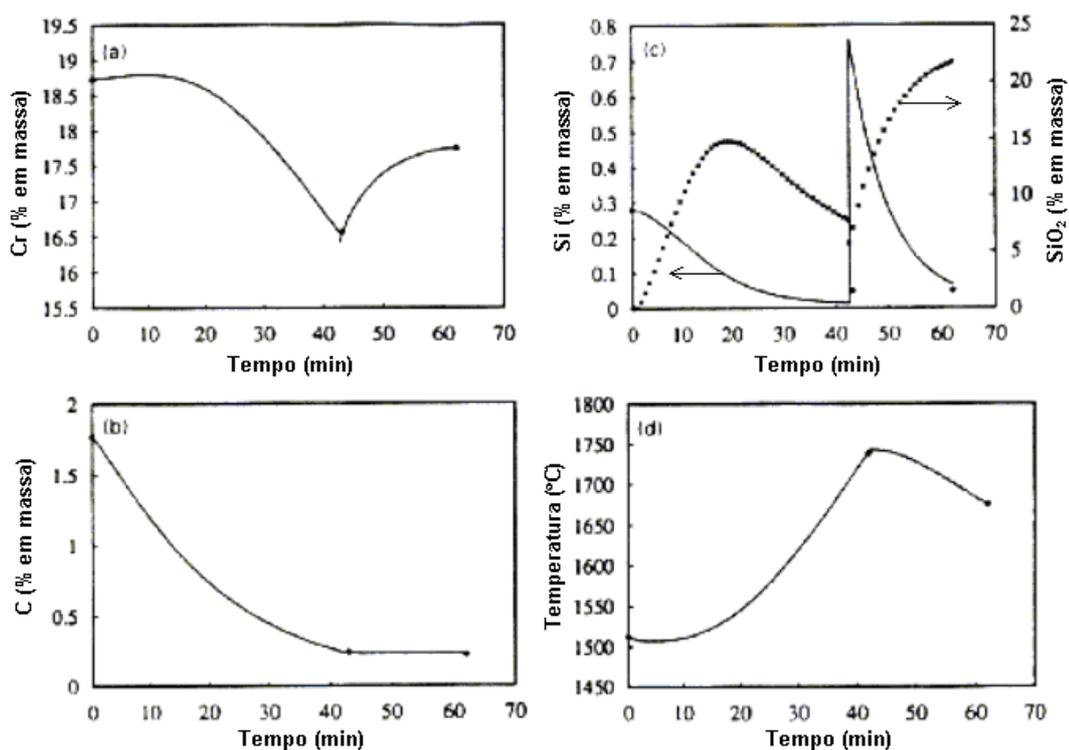


Figura 3.6 - Evolução do percentual de cromo, silício, carbono e temperatura em um processo típico de refino de aço inoxidável em convertedores AOD-L (Richardson 1953) citado por (Sartori 2009).

Apesar das condições operacionais da ArcelorMittal Inox Brasil serem muito diferentes das demais empresas, o processo de refino no convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil apresenta um comportamento similar ao processo típico de refino em AOD's.

3.4 - Princípios Teóricos da Fabricação de Aço Inoxidável em Convertedores AOD-L

3.4.1 Mecanismos de Descarburação

A grande maioria dos aços inoxidáveis apresentam baixos níveis de carbono em sua composição química (0,01 à 0,04%). É necessário, portanto, que os convertedores utilizados para a produção dos aços inoxidáveis apresentem uma boa eficiência de descarburação. O conceito de produção de aço inoxidável em convertedor AOD-L, segundo Hallsten (2007), se fundamenta na redução da pressão parcial do CO através da injeção de argônio junto ao oxigênio durante o processo. O argônio soprado dilui o monóxido de carbono formado durante o processo, levando a uma menor pressão parcial P_{CO} . Uma menor pressão parcial do monóxido de carbono promove a formação do gás CO favorecendo a descarburação do banho metálico. Segundo Hallsten (2007) é possível obter valores similares de carbono final em convertedores AOD-L operando com temperaturas baixas, porém com pressões parciais de CO mais altas. Como exemplo é ilustrado na Figura 3.7 o diagrama do potencial de oxigênio para diferentes pressões parciais P_{CO} . Para pressão normal, P_{CO} de 1 atm, é requerido temperatura de 1940°C para reduzir o carbono a valores percentuais de 0,03%. Quando a pressão parcial P_{CO} do monóxido de carbono é reduzida abaixo da pressão normal de 1 atm é possível obter o mesmo teor de carbono com temperaturas inferiores, que podem chegar à 1600°C.

A otimização do sopro de argônio para controle da pressão de CO permite a operação com menores temperaturas favorecendo o processo no convertedor AOD.

Benefícios econômicos, advindos do menor tempo de processo e menor desgaste refratário, possibilitam redução de custo da corrida, permitindo o aço inoxidável tornar mais competitivo

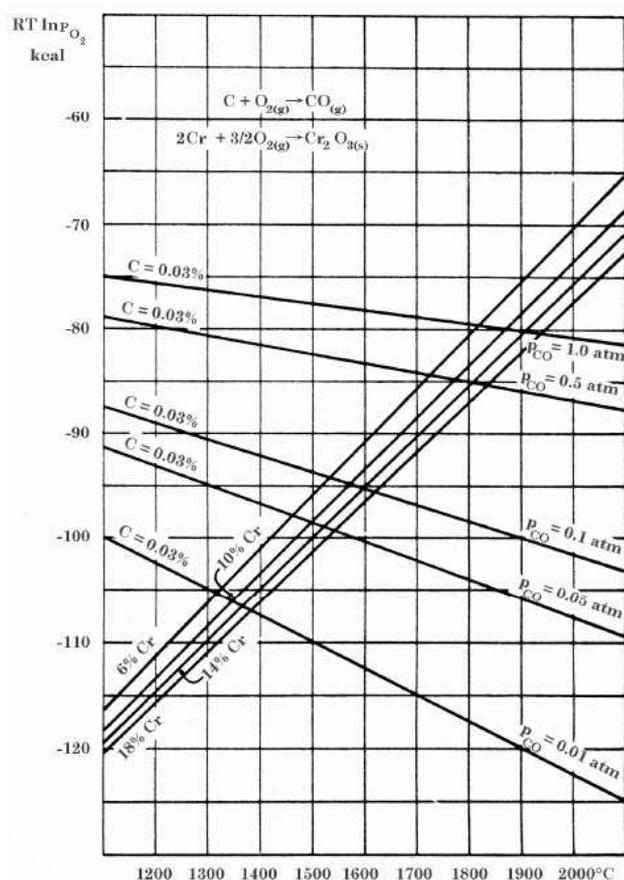


Figura 3.7 - Diagrama do potencial de oxigênio (Hallsten 2007).

A eficiência de remoção do carbono (CRE), medida pelo volume total de oxigênio soprado no banho e pelo oxigênio consumido na oxidação do carbono é expresso pela equação (3.1). Para reduzir a oxidação de cromo é importante desenvolver um processo com alta eficiência de remoção do carbono, considerando que o oxigênio que não participa da descarburização, promove a oxidação dos metais.

$$CRE = \frac{O_2(\text{Oxidação Carbono})}{O_2(\text{Total}) \times 100} \quad (3.1)$$

Onde:

CRE= Eficiência de remoção de carbono;

$O_2(\text{oxidação do carbono})$ = Volume de O_2 que participou da oxidação do carbono;

$O_2(\text{total})$ = Volume de O_2 total soprado durante o processo.

Quando a eficiência de remoção do carbono cai é necessário reduzir a relação O_2/Ar , obtida na prática através do aumento gradativo do sopro de argônio para redução da pressão parcial do monóxido de carbono. A Figura 3.8 mostra as fases do processo e a evolução do CRE em cada fase. No início do processo com relação de O_2/Ar de 3:1 tem-se CRE máximo de 90%, que tem sua redução gradativa à medida que o carbono cai. A fase 2 se inicia quando o CRE é igual a 45%, carbono igual a 0,44%, relação O_2/Ar 1:1 e o CRE inicial é de 100%, que também apresenta redução gradativa à medida que o carbono cai. A fase 3, com maior participação de argônio com relação O_2/Ar de 1:3, se estende até a obtenção do carbono requerido. A evolução do percentual do carbono, cromo e temperatura em cada uma das 3 fases do processo do AOD-L é mostrado na Figura 3.9.

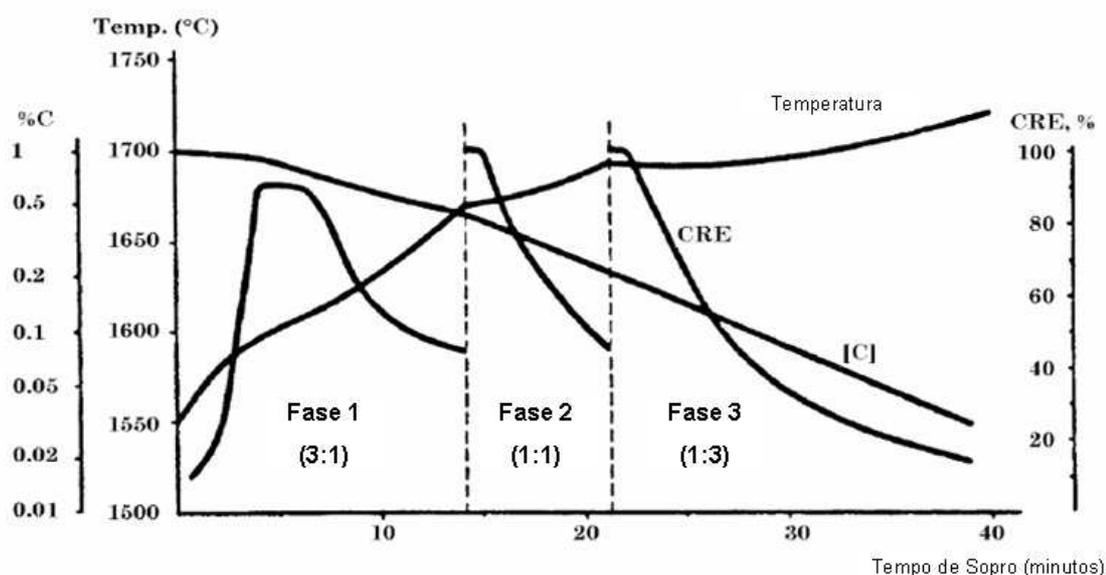


Figura 3.8 - Eficiência de remoção do carbono CRE, temperatura e carbono nas fases do processo em convertedor AOD (Hallsten 2007).

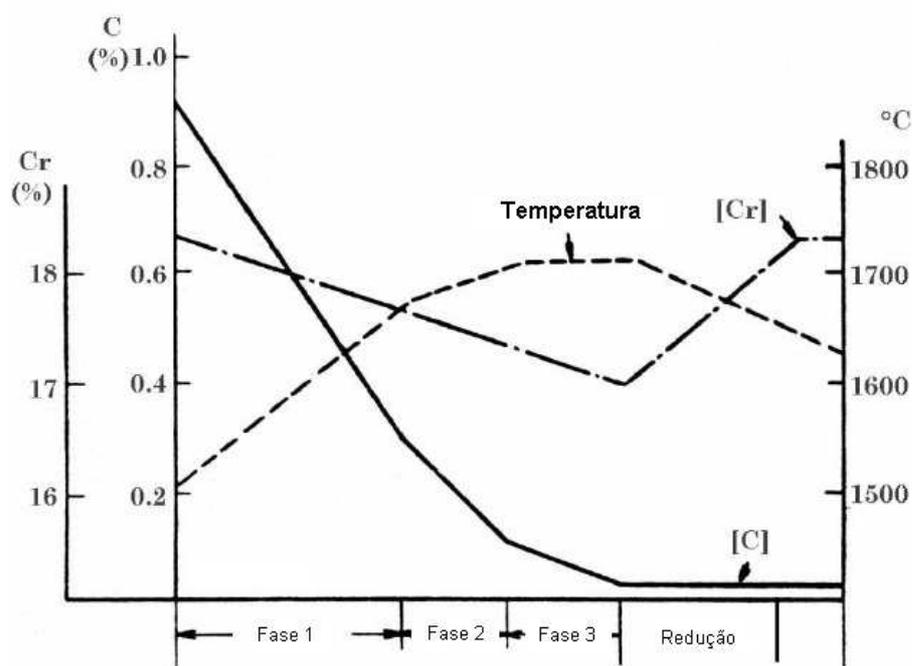


Figura 3.9 - Evolução do teor de carbono, cromo e temperatura nas fases do processo do AOD-L (Hallsten 2007).

Diferentes variáveis de processo, que têm influência na taxa de descarburização, precisam ser controladas para melhor eficiência de remoção do carbono e menor oxidação dos metais nobres.

No próximo capítulo vão ser descritas algumas variáveis de processo que precisam ser controladas para controle da taxa de descarburização.

3.4.2 Influência de Diferentes Variáveis no Processo de Descarburização

O efeito de diferentes variáveis no processo de descarburização de aço inoxidável foram simuladas e comparadas com dados encontrados na literatura por Marin (2006). Abaixo estão descritas as principais variáveis estudadas bem como sua influência na taxa de descarburização.

3.4.2.1 Temperatura

A Figura 3.10 apresenta o efeito da temperatura sobre a taxa de descarburização. A simulação realizada por Marin (2006) demonstrou que para uma mesma quantidade de oxigênio soprado, é possível obter teores mais baixos de carbono no fim de sopro através da operação com temperaturas mais altas. Os resultados encontrados na simulação estão coerentes com os resultados encontrados na prática industrial.

Com o aumento da temperatura, a quantidade de oxigênio dissolvido no banho aumenta. Maior quantidade de oxigênio dissolvido no banho é preponderante no sentido de aumentar a taxa de descarburização apesar da reação do carbono com o oxigênio ser “favorecida” pelo decréscimo da temperatura.

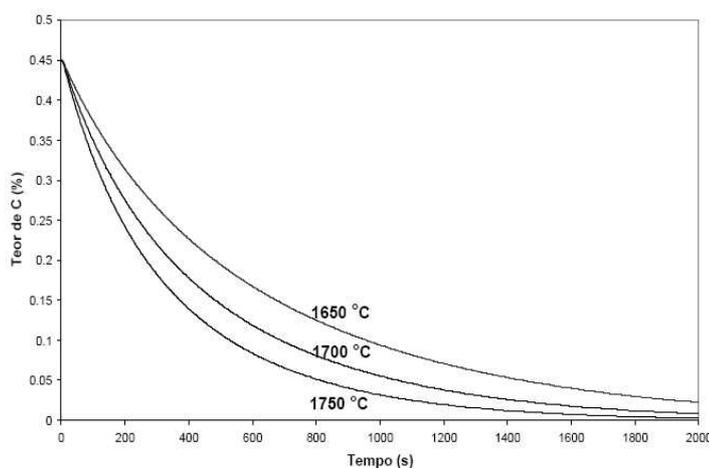


Figura 3.10 - Gráfico do efeito da temperatura na descarburização (Marin 2006).

3.4.2.2 Relação Oxigênio:Gás inerte

Na Figura 3.11 é apresentado o efeito da diluição do oxigênio com gás inerte (relação $O_2:N_2$) sobre a taxa de descarburização. As simulações realizadas por Marin (2006) demonstraram que a descarburização é favorecida pelo aumento da diluição do oxigênio.

Para uma mesma quantidade de oxigênio soprado, é possível obter teores mais baixos de carbono no fim de sopro, aumentando a diluição de oxigênio. Neste caso, o gás inerte tem o

papel de diluir o CO e reduzir sua pressão parcial favorecendo a descarburização. Normalmente o uso de gás inerte é limitado pelos altos custos e seu efeito “refrigerante”, que age com sentido inverso na taxa de descarburização.

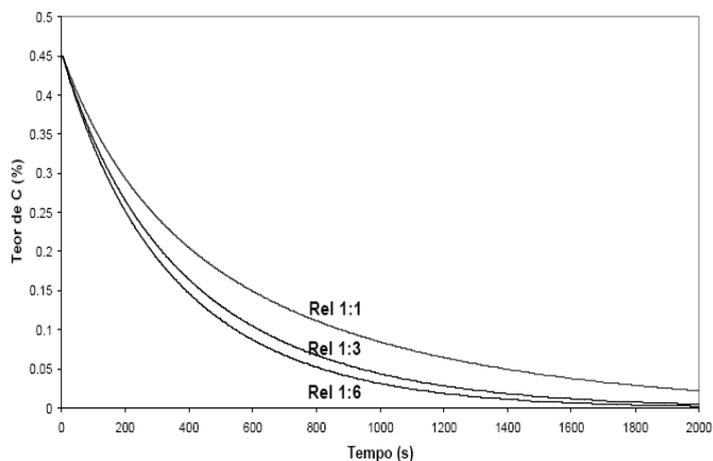


Figura 3.11 - Gráfico do efeito da diluição do oxigênio com gás inerte na descarburização (Marin 2006).

3.4.2.3 Composição Química

As Figura 3.12 e Figura 3.13 apresentam o efeito da composição química do banho metálico sobre a taxa de descarburização. As simulações realizadas por Marin (2006) demonstraram que a descarburização é favorecida com o aumento do teor de níquel. Para uma mesma quantidade de oxigênio soprado é possível obter teores mais baixos de carbono no fim de sopro aumentando o teor de níquel do banho, que promovem a diluição do cromo favorecendo a descarburização.

Para o cromo o efeito é inverso, maiores percentuais de cromo no banho prejudica a descarburização. Os resultados são coerentes com os resultados encontrados na bibliografia e na prática industrial. O cromo tem grande afinidade com o oxigênio e compete com o carbono pelo oxigênio. O efeito do teor de cromo sobre a taxa de descarburização é mais relevante do que o efeito do níquel na taxa de descarburização.

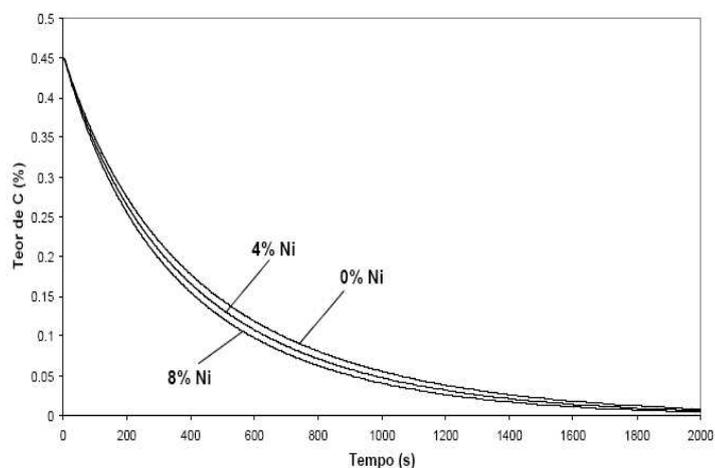


Figura 3.12 - Gráfico do efeito do teor de Níquel na taxa de descarburização (Marin 2006).

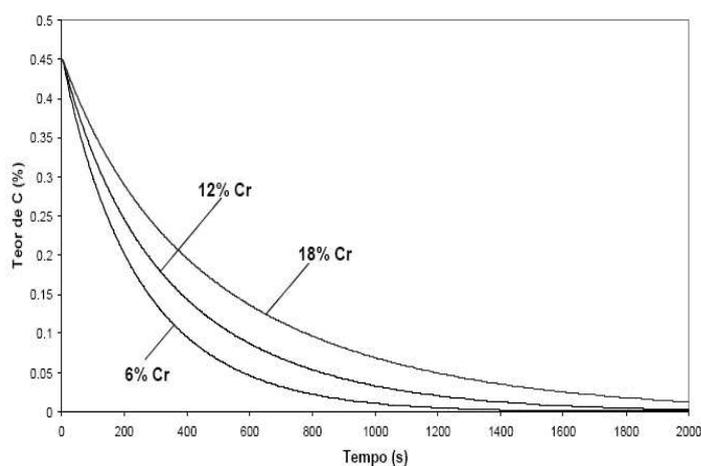


Figura 3.13 - Gráfico do efeito do teor de Cromo na taxa de descarburização (Marin 2006).

3.4.2.4 Teor de Oxigênio Dissolvido no Banho

É apresentado na Figura 3.14 a evolução do teor de oxigênio dissolvido no banho em função da temperatura. Observa-se que o teor de oxigênio sobe rapidamente, se estabiliza e em seguida cai lentamente. À medida que os teores de carbono e cromo do banho caem, o equilíbrio tende a cair e o teor de oxigênio dissolvido cai. Para temperaturas mais altas, tem-se maior quantidade de oxigênio dissolvido no banho decorrente também do equilíbrio

termodinâmico entre os óxidos e o oxigênio dissolvido ($\text{MeO}_x \rightarrow \text{Me} + x\text{O}$). Para esta simulação a relação oxigênio/gás inerte foi mantida constante.

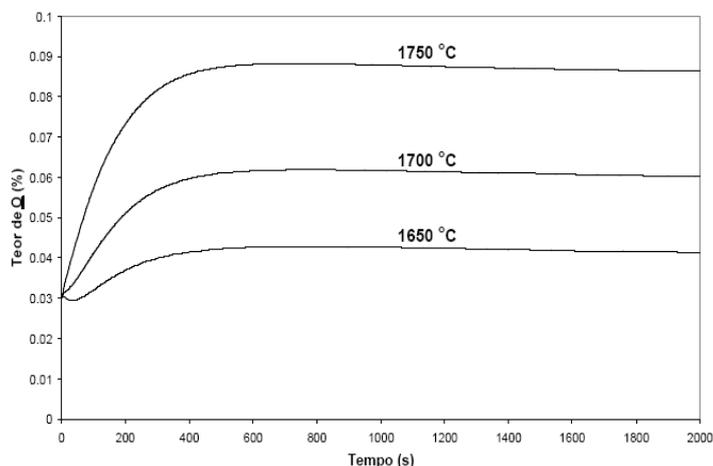
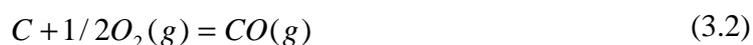


Figura 3.14 - Gráfico do efeito da temperatura no percentual de oxigênio dissolvido no banho (Marin 2006).

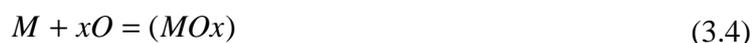
3.4.3 Controle da Oxidação de Cromo

Durante o processo de descarburização, outros elementos que têm afinidade com o oxigênio como silício, manganês e cromo tem grande tendência a serem oxidados. Como os aços inoxidáveis apresentam em sua composição grandes quantidades de cromo, a oxidação deste elemento é inevitável. Através do controle do processo e da otimização do sopro de oxigênio e argônio é possível controlar as reações químicas de descarburização e reduzir a oxidação de metais nobres.

Segundo Verduyssen (1994) as reações químicas envolvidas na descarburização podem ser diretas ou indiretas. Durante a descarburização direta, o carbono reage com oxigênio gasoso, representado pela reação (3.2), ou com oxigênio dissolvido no metal líquido, representado pela reação (3.3).



O oxigênio injetado pode dissolver e reagir com o carbono e com os metais (M) do banho, como mostrado na equação (3.4).



Os metais oxidados formam Cr_2O_3 , FeO, MnO e ficam aderidos às bolhas de gás inerte próximo à região das ventaneiras, formando uma espécie de casca de óxidos que sobe no banho junto com as bolhas de gás soprado. Durante sua subida, os óxidos reagem com o carbono dissolvido no banho, formando gás CO que vai para o interior das bolhas e participa da redução dos metais que retornam para o banho metálico. Este tipo de descarburção é denominada indireta e pode ser representada pela reação (3.5)



A Figura 3.15, apresenta um resumo das reações de descarburção e outras possíveis reações em um conversor de sopro combinado. Na zona de impacto do oxigênio com o metal, a descarburção direta, reação (3.2), é a mais propícia a acontecer. Nesta região o oxigênio pode dissolver no metal fundido e metais podem ser oxidados, representado pela reação (3.4). No banho metálico, a descarburção direta e descarburção indireta são possíveis. Na interface metal-escória podem ocorrer reações de redução de alguns óxidos metálicos para formação de óxidos mais estáveis. Na região do jato de oxigênio, ocorre a reação de pós-combustão.

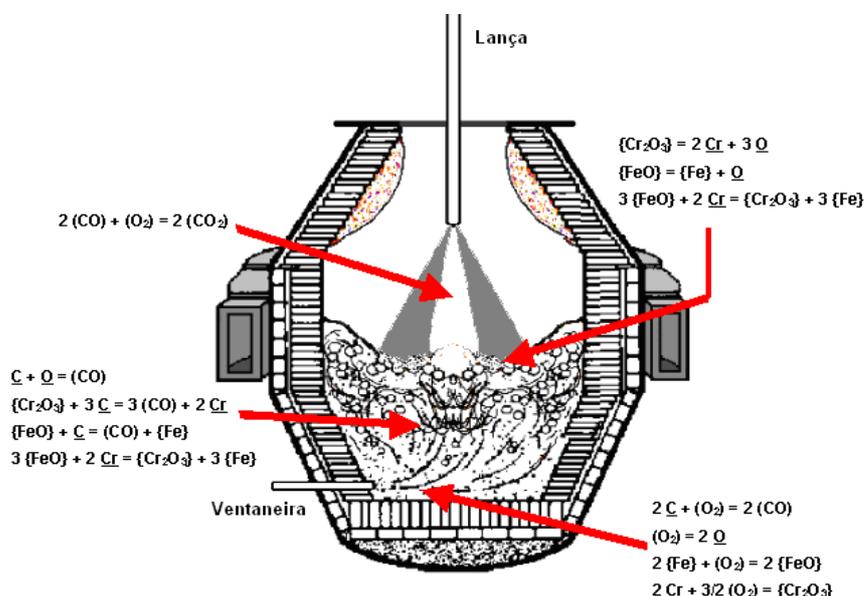
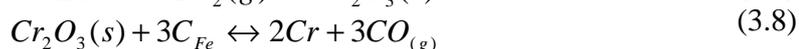
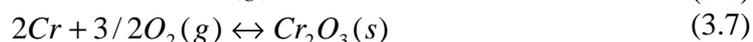
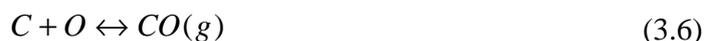


Figura 3.15 - Algumas reações possíveis em um convertidor com sopro combinado (Marin 2006).

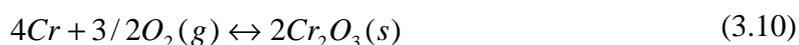
As principais reações envolvidas no processo e que devem ser controladas para reduzir a oxidação de cromo são:



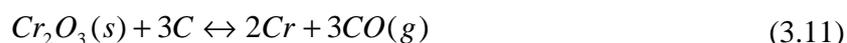
Através da combinação das reações descritas acima tem-se:



Estudos mencionados por Hallsten (2007) indicam que a oxidação do cromo depende do carbono contido no banho e da relação O_2/Ar e são diretamente dependentes do processo de sopro definido. A reação (3.10) ocorre em maior quantidade quando os teores de carbono do banho estão próximos do carbono objetivado no fim de sopro e a relação O_2/Ar não está adequada para a etapa do processo.



Através da otimização do sopro pelas ventaneiras o Cr_2O_3 formado durante o processo participa da descarburização do metal. As partículas de Cr_2O_3 são transportadas pelas bolhas de argônio soprado pelas ventaneiras, vão para a superfície do metal, e em contato com o carbono do banho participam da descarburização indireta representada pela reação (3.11). As partículas de Cr formadas passam a compor então o metal líquido.



Os metais oxidados que não participaram do processo de descarburização indireta fazem parte da escória que devem ser recuperados durante a fase de redução.

3.4.4 Redução da Escória de Processo

Segundo Sartori (2009) os metais oxidados que compõem o banho são transportados para a escória através das bolhas de argônio e monóxido de carbono formados durante o processo. Os óxidos metálicos são recuperados para o metal através da redução da escória, que pode ocorrer através da adição de alumínio ou ferro silício. Cuidados especiais devem ser tomados quando o alumínio é utilizado como redutor. A formação de inclusões de Al_2O_3 definidas por Suzuki et al (2002) podem ser prejudiciais para a qualidade do aço.

A reação de redução da cromita é descrita pela reação (3.12).



Metais com grande afinidade com oxigênio podem reduzir os óxidos metálicos com menor afinidade com o oxigênio. O silício tem maior afinidade com o oxigênio quando comparado com os elementos cromo, ferro, níquel e, portanto, as reações de redução são favorecidas quando ferro silício é adicionado na presença destes óxidos. Na Figura 3.16 é mostrado o diagrama de Ellingham simplificado contendo a energia livre padrão para diferentes elementos. A reação de oxidação da sílica ocorre preferencialmente às reações que apresentam menor potencial de oxidação. No diagrama o eixo das ordenadas é representado

pelo ΔG° e o eixo das abscissas a temperatura. O potencial de oxigênio descrito na equação (3.13) é obtido pelo rearranjando da equação de ΔG° .

$$PO_2 = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (3.13)$$

Onde:

PO_2 = Pressão parcial de O_2 ;

ΔG° = Energia livre padrão;

R = Constante de equilíbrio (J/mol.k);

T = Temperatura (k).

Fazendo análise do diagrama de Ellingham simplificado, descrito na Figura 3.16, e considerando a equação (3.13) é possível definir qual elemento químico tem maior potencial de oxidação. Considerando como exemplo as reações de oxidação do silício e do cromo, e os valores de ΔG° descritos no eixo das ordenadas da Figura 3.16, conclui-se que para uma mesma temperatura a oxidação do silício ocorre preferencialmente à oxidação do cromo.

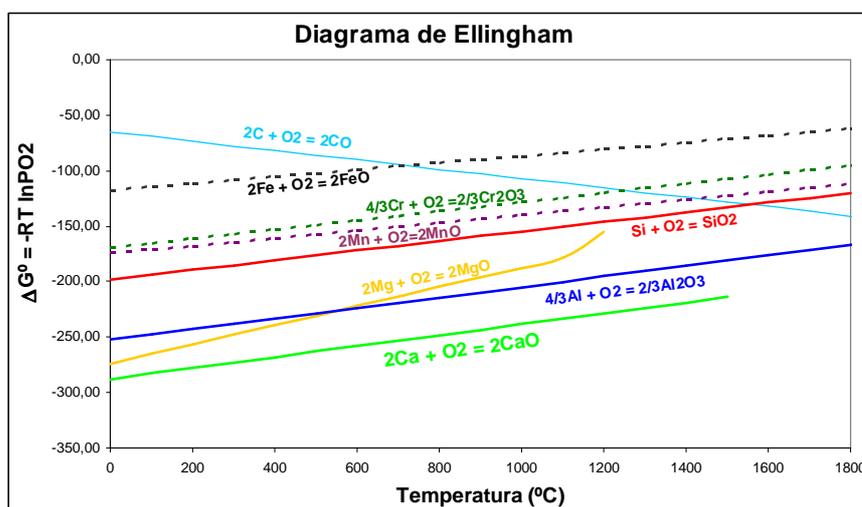


Figura 3.16 - Diagrama de Ellingham simplificado (Sartori 2008).

A reação (3.12) é favorecida quando a atividade da SiO_2 é baixa, obtida na prática através da adição de CaO durante o processo no convertedor AOD-L. O grande objetivo da reação

de redução é a recuperação do cromo e metais nobres contido na escória, porém a redução de outros elementos contidos na escória é inevitável. Residuais como chumbo, estanho entre outros elementos prejudiciais à qualidade do aço devem, portanto, ser combatidos na entrada do processo, através da seleção das matérias-primas.

3.5 Sopros Combinado em Convertedor AOD-L

Atualmente existe uma extensa literatura sobre o efeito do sopro combinado (Lança de topo e ventaneiras) para os processos de produção de aço carbono. Para o processo de produção de aço inoxidável em convertedor AOD-L, os estudos do efeito do sopro combinado são limitados, se concentrando principalmente em estudos de sopro com ventaneiras, desconsiderando a lança de topo. O efeito do diâmetro das ventaneiras, ângulo entre as ventaneiras e vazão das ventaneiras foram estudadas por Fabritius et al (2003), em um modelo à frio, para definir a vazão de trabalho de um convertedor de 150 t. A vazão de gases inadequada nas ventaneiras podem causar desgaste do revestimento refratário e deficiência operacional durante o processo de descarburização. Vazão abaixo da ideal podem causar desgaste prematuro do refratário na região das ventaneiras devido o fenômeno de “Back Attack” e em casos extremos entupir as ventaneiras. Vazão acima da ideal podem causar desgaste refratário irregular na parede do lado oposto das ventaneiras e deficiência no processo de descarburização em função da mistura irregular do banho metálico e escória no interior do convertedor. A Figura 3.17 ilustra um exemplo de baixa penetração dos gases nas ventaneiras (a) e alta penetração de gases pelas ventaneiras (b).

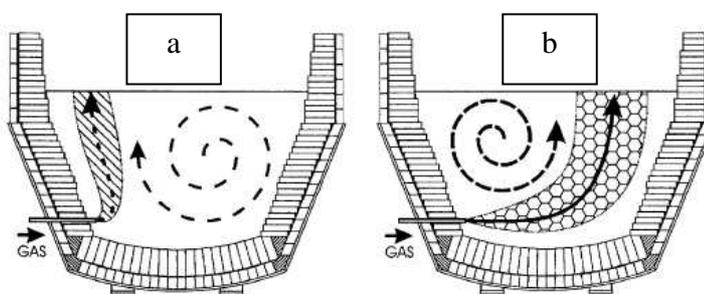


Figura 3.17 – Desenho esquemático da baixa penetração de gases pelas ventaneiras (a) e alta penetração de gases pelas ventaneiras (Fabritius et al 2003).

No estudo realizado por Fabritius et all (2003) foi avaliado a penetração dos gases pelas ventaneiras para o diâmetro das ventaneiras de 2 e 3 mm, vazão de sopro de 0,020 Nm³/min./ventaneira indicada na Figura 3.18 pelos pontos 1 e 4, vazão de 0,050 Nm³/min./ventaneira indicada pelos pontos 2 e 5 e vazão de 0,080 Nm³/min./ventaneira indicada pelos pontos 3 e 6.

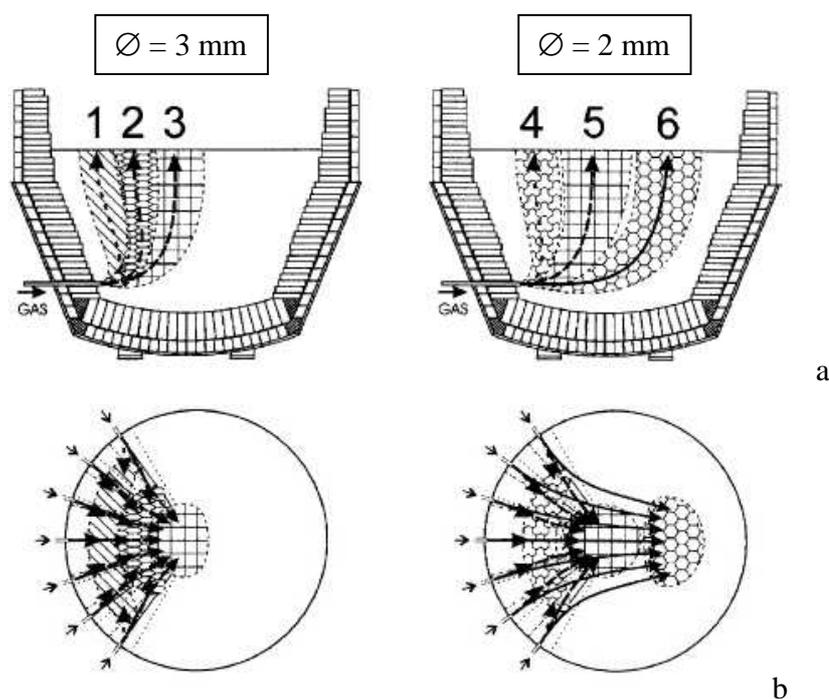


Figura 3.18 – Penetração dos gases soprado pelas ventaneiras para o diâmetro das ventaneira de 2 e 3 mm e vazão de sopro de 0,020 Nm³/min. (pontos 1 e 4), de 0,050 Nm³/min. (pontos 2 e 5) e de 0,080 Nm³/min. (pontos 3 e 6). (a) Vista lateral, (b) Vista superior. (Fabritius et all 2003).

A redução do diâmetro das ventaneiras de 3 para 2 mm, provoca um aumento da pressão de sopro, e conseqüentemente uma maior penetração no banho dos gases soprados para todas as vazões estudadas. Observa-se uma maior penetração de sopro pelas ventaneiras para vazões mais altas para os experimentos com ventaneira de 2 e 3 mm.

Buscando avaliar o efeito da vazão de sopro pelas ventaneiras e lança de topo, número de ventaneiras e ângulo entre as ventaneiras na intensidade de agitação do banho, Wei et al 2010 realizaram experimentos em um modelo de água simulando um convertedor AOD-L de 120 t.

Os resultados obtidos nos experimentos mostraram uma maior agitação do banho com o aumento da vazão de gases pelas ventaneiras. O ângulo de separação entre as ventaneiras tem efeito na agitação do banho, que apresenta comportamento mais homogêneo à medida que o ângulo de separação entre as ventaneiras aumenta. Foi observada uma agitação mais intensa do banho durante as simulações de sopro utilizando lança de topo. O aumento da vazão de gás soprado pela lança de topo também proporcionam uma maior agitação do banho, ilustrado na Figura 3.19. A simulação foi feita no modelo contendo 4 ventaneiras com ângulo de separação de 45° e vazão da lança de topo de $79,87 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Pela figura observa-se uma maior turbulência do banho quando a simulação é feita com a lança de topo demonstrando uma maior intensidade de agitação do banho.

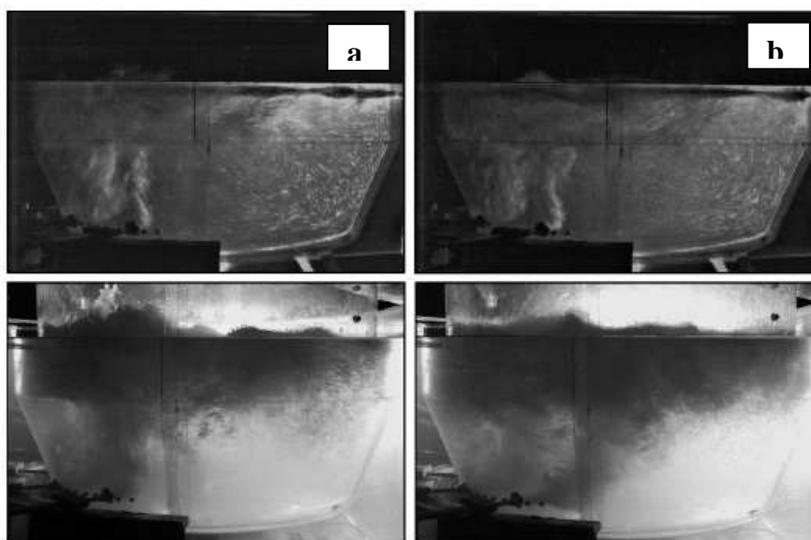


Figura 3.19 - Efeito do sopro com lança na intensidade de agitação do banho para a simulação no modelo contendo 4 ventaneiras com ângulo de separação de 45° e vazão da lança de topo de $79,87 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (a) sopro com ventaneira (b) sopro com ventaneira e lança de topo.

Experiências com utilização de lança de topo com diferentes configurações foram estudadas por Li et al (2007) e aplicada na prática em um convertedor AOD-L de 120 t. da Baosteel. Nos experimentos foram avaliadas a taxa de descarburização, taxa de elevação de temperatura e oxidação do cromo durante o sopro para lança de topo contendo 1 e 3 furos com ângulo de inclinação da lança de 3 furos de 11 e 15°. Os resultados obtidos na prática demonstraram vantagens de utilização da lança de 3 furos com ângulo de inclinação de 11°, em função da melhor taxa de descarburização, menor oxidação de cromo e taxa de aquecimento do banho semelhante aos resultados alcançados com a lança de 3 furos com ângulo de inclinação de 15°. A Tabela I apresenta os resultados obtidos nos experimentos práticos.

Tabela I – Resultados dos testes experimentais realizados por Li et al (2007) no convertedor AOD-L da Baosteel.

	% Cromo Banho	Taxa de Aquecimento do Banho (°C/min.)	Taxa de descarburização (%/min)
Lança de 1 furo	17,01	6,5	0,12
Lança de 3 furos / inclinação 11°	17,27	6,7	0,14
Lança de 3 furos / inclinação 15°	16,95	6,8	0,08

3.6 Refratários para Convertedor AOD

Segundo Choulet et al (1998) os tipos de refratário utilizados em convertedores AOD vêm sendo desenvolvidos desde o início de operação do primeiro convertedor em Indiana em 1968. Inicialmente refratários cromo-magnesianos foram utilizados, porém, desde o início da década de 70 tijolos refratários dolomíticos vêm sendo utilizados em convertedores AOD na Europa e desde 1976 passou a ser utilizado também por empresas nos Estados Unidos.

Desde os testes iniciais a utilização de refratários dolomíticos tem se tornado predominante em convertedores AOD devido os benefícios econômicos advindos do menor custo, boa performance e compatibilidade com todos os processos metalúrgicos. Além dos benefícios econômicos, benefícios metalúrgicos decorrentes da melhor eficiência de dessulfuração são

obtidos pela operação com maior basicidade, segundo Choulet et al (1998) e descrito na relação (3.14).

$$\frac{(CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3)} > 1,4 \quad (3.14)$$

Atualmente, a opção de utilização de refratários cromo-magnesiano, está relacionada com necessidades impostas pelo processo operacional de algumas empresas em que a temperatura do metal pode chegar à 1800° C.

3.6.1 Mecanismos de Desgaste Refratário

Cada região refratária do convertedor é submetida a diferentes mecanismos de desgaste. Segundo definições de Choulet et al (1998) os mecanismos de desgaste refratário podem ser classificados como desgaste físico e desgaste químico.

- Desgaste físico: o desgaste físico pode ocorrer de duas formas:

1- Erosão: Causada pelo atrito do metal com o refratário. É provocado pela turbulência do banho decorrente da injeção de gases pelas ventaneiras e lança de topo.

2- Choque térmico: Ocorre quando o refratário sofre um lascamento em sua superfície. O lascamento é causado por variações bruscas de temperaturas decorrentes principalmente de paradas no fluxo de produção provocando a queda de temperatura do refratário.

- Desgaste químico: o desgaste químico também pode ocorrer de duas formas:

1- Corrosão: Causada pela interação da escória com o refratário. Este tipo de desgaste é intensificado quando a escória tem quantidade deficiente de CaO e MgO

(baixa basicidade). Neste caso os elementos presentes no refratário se deslocam para a escória buscando o equilíbrio termodinâmico.

2- Ataque metálico: Decorrente da interação de elementos metálicos redutores (Al, Si) com o refratário.

A vida refratária do convertedor AOD-L é parcialmente dependente do tamanho do vaso devido os efeitos da turbulência e varia de 30 a 50 corridas em vasos com capacidades menores do que 50 toneladas e acima de 120 corridas para vasos com capacidade acima de 90 toneladas, conforme estudos realizados por Choulet et al (1998). A região das ventaneiras apresentam maior incidência de desgaste e variam de 2 à 8 mm por corrida em convertedores sem sopro com lança de topo. Para convertedores que utilizam lança de topo o desgaste refratário na região das ventaneiras varia de 8 à 12 mm por corrida. No balanço global, considerando todo o revestimento refratário, o desgaste típico é de aproximadamente 1 à 4 mm por corrida.

3.6.2 Aplicação de Refratários em Convertedores AOD

O revestimento refratário do convertedor AOD é usualmente dividido em revestimento de segurança e revestimento de trabalho.

Revestimento de segurança: é o revestimento que fica sob o revestimento de trabalho. Sua principal função é proteger a carcaça metálica do vaso e evitar o vazamento de metal caso o revestimento de trabalho tenha desgaste excessivo.

Revestimento de trabalho: é todo o revestimento que fica exposto em contato com o metal. O revestimento de trabalho pode ser dividido em regiões, em função das propriedades requeridas e da taxa de desgaste de cada região.

As principais regiões do revestimento refratário de um convertedor AOD são:

- Fundo: é a região inferior do convertedor. Pode ter o formato reto ou curvo.
- Região das ventaneiras: é o revestimento refratário que fica ao redor das ventaneiras. O comprimento dos tijolos nesta região, normalmente é superior ao das outras regiões do vaso. Esta região é a que normalmente define o fim de vida do revestimento refratário, devido ao maior desgaste, provocado pela grande turbulência gerada com a injeção de gases pelas ventaneiras e lança de topo e pelas altas temperaturas decorrentes das reações de oxidação.
- Paredes e linha de escória: é a região do vaso que está exposta em contato com o metal e escória durante o processo. Esta região é sensível a análise química da escória, podendo sofrer desgaste excessivo caso a basicidade (CaO/SiO_2) da escória seja baixa.
- Flange e junção: esta região fica acima do nível do banho e não tem contato direto com o metal durante o processo. Esta região requer um cuidado especial durante a montagem do revestimento refratário, para evitar infiltração de metal durante o processo de carregamento e vazamento do convertedor.
- Cone: é a região superior do vaso e apresenta a forma de um cone. Esta região é solicitada no momento de carregamento e vazamento. Nesta região é formado o “cascão” metálico devido à projeção de partículas de metal e escória durante o processo de sopro com lança.
- Bico de vazamento: o bico de vazamento é a extremidade por onde o metal e escória passam no momento do vazamento das corridas. A qualidade do refratário no bico de vazamento é extremamente importante para permitir um vazamento rápido da corrida e prevenir “pick-up” de nitrogênio.

A Figura 3.20 mostra o convertedor AOD, destacando as diversas regiões do revestimento refratário. A Figura 3.21 mostra uma visão detalhada da ventaneira do convertedor AOD-L.

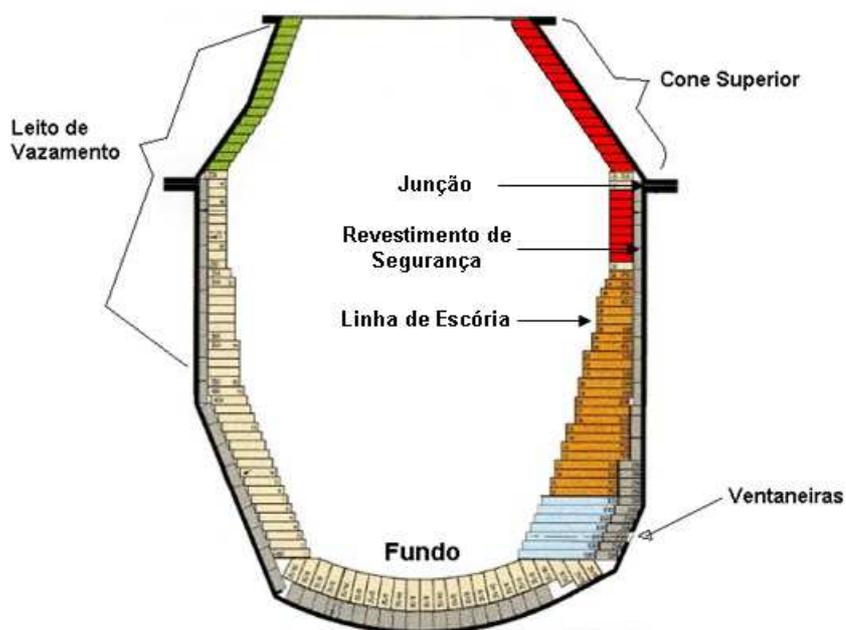


Figura 3.20 - Desenho esquemático de um convertedor AOD, destacando as diversas regiões (Choulet et all 1998).

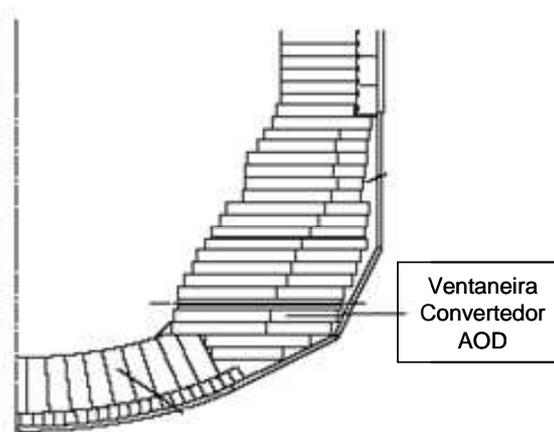


Figura 3.21 - Visão detalhada da região das ventaneiras do convertedor (Choulet et all 1998).

3.7 Variáveis de Processo que Afetam o Desempenho Refratário

Para um bom desempenho refratário em convertedores AOD é necessário um controle operacional das variáveis de processo. O controle da composição química e fluidez da escória durante todo o processo de elaboração do aço inoxidável é fundamental para um bom desempenho refratário. A condição ideal da escória é similar para os diversos tipos de refratário utilizado em convertedores AOD, sendo os refratários dolomíticos e de magnésia carbono mais tolerantes a altas basicidades superiores a 1,4. Outros parâmetros operacionais que devem ser controlado para melhorar o desempenho refratário são:

- temperatura de processo. A temperatura não deve exceder 1700°C;
- controle de formação de bode nas ventaneiras;
- tempo de processamento da corrida.

O controle inadequado da formação do bode nas ventaneiras e a composição química inadequada da escória podem proporcionar desgaste refratário que excedem 20 mm por corrida.

3.7.1 Controle da Escória

O controle da composição química da escória durante o processo de produção de aço inoxidável esta relacionado com o tipo de revestimento refratário utilizado. Para refratário cromo-magnésiano a variação da basicidade deve ser de 1,2 a 1,5. Basicidade acima de 1,5 para este tipo de refratário provoca uma corrosão química e conseqüente deterioração dos tijolos refratários. Ao contrario do refratário cromo-magnésiano o refratário dolomítico requer basicidade que variam de 1,4 a 2,0, sendo uma das razões pela qual muitas empresas optam por este tipo de revestimento. Operação com basicidade superior proporcionam melhor dessulfuração e recuperação de metais nobres oxidados durante o processo. A Figura 3.22 mostra o efeito da basicidade na recuperação do cromo da escória.

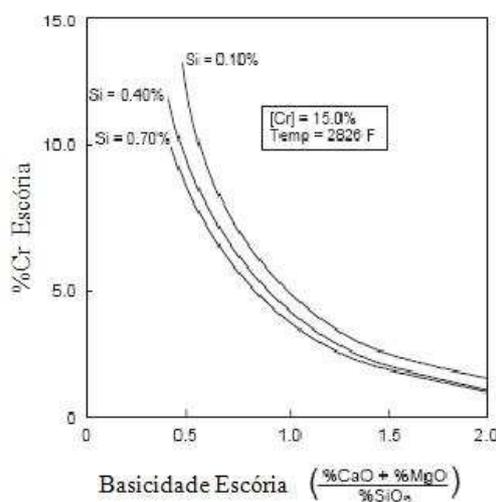


Figura 3.22 - Estimativa do percentual de cromo contido na escória em função da basicidade (Choulet et all 1998).

3.7.2 Transferência de Escória

O controle da composição química e da quantidade de escória transferida do pré-metal para o convertedor é imprescindível para um bom controle do processo e conseqüente desempenho refratário. Grande variação na composição química da escória carregada no convertedor provoca erro no cálculo da quantidade de fundentes requerida em cada fase do processo, contribuindo para desgaste acentuado desde o início de sopro no convertedor.

3.7.3 Escória de Descarburção

O controle da escória gerada durante o processo de descarburção é essencial para o bom desempenho refratário. No início do processo de sopro com lança ocorre a formação de uma escória corrosiva contendo grandes quantidades de SiO_2 , Fe_2O_3 e Cr_2O_3 . Para neutralizar os óxidos ácidos, CaO e MgO devem ser adicionados anteriormente ao sopro de oxigênio com lança. O MgO adicionado reage com os óxidos de Fe, Mn e Cr formando um sólido ou quase sólido complexo que limita o desgaste refratário durante o processo de descarburção. Escórias que apresentam quantidade insuficiente de CaO e MgO têm característica fluida e são prejudiciais para o revestimento refratário.

3.7.4 Escória de Redução

Durante a fase de redução a escória apresenta grandes mudanças em sua composição. A fase pastosa, composta por metal líquido e sólido, deixa de existir uma vez que os óxidos de Cr, Mg, Fe são reduzidos pelo silício ou alumínio adicionados no banho. O óxido SiO_2 e Al_2O_3 gerado durante a redução tem que ser neutralizado com CaO para reduzir o desgaste refratário. A variação da basicidade ($\text{Cão}/\text{SiO}_2$) da escória reduzida com sílica deve estar entre 1.6 a 1.8 contendo entre 8 a 12% de MgO. Melhor desempenho refratário, melhor desulfuração do banho e boa recuperação dos metais oxidados são obtidos com basicidades superior a 2.

3.7.5 Controle da Formação do “bode” nas Ventaneiras

O controle do tamanho do aglomerado sólido formado nas ventaneiras, popularmente conhecido com o nome “bode”, é essencial para prevenção de falhas prematuras nesta região. O aglomerado sólido formado é controlado pelo fluxo dos gases de refrigeração das ventaneiras. O “bode” grande é gerado pela maior pressão dos gases de refrigeração na entrada das ventaneiras e pode direcionar o fluxo dos gases de processo sobre os tijolos refratários, acelerando seu desgaste. O “bode” pequeno é gerado pela menor pressão dos gases de refrigeração e não protege os tijolos ao redor das ventaneiras, que pode ter desgaste excessivo durante o processo. O tamanho adequado do “bode” das ventaneiras depende de cada processo, porém já é de conhecimento que o tamanho típico está entre 25 a 75 mm. A Figura 3.23 ilustra o efeito do resfriamento ideal, insuficiente e excessivo.

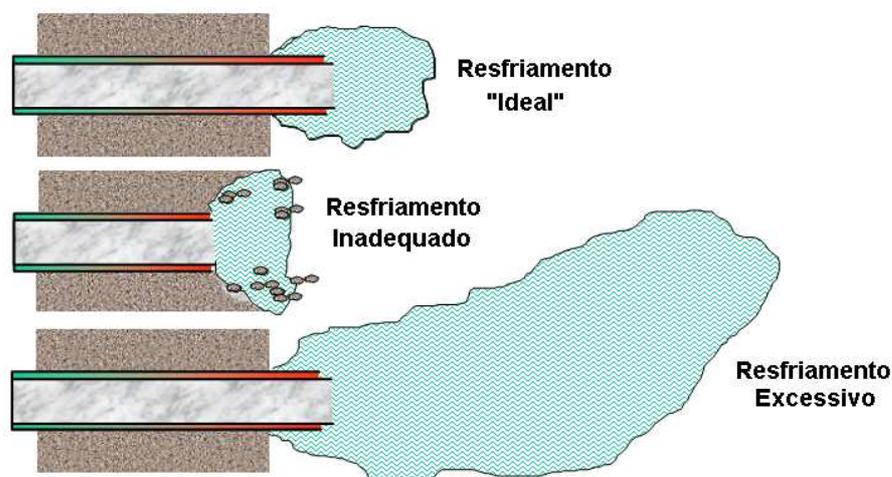


Figura 3.23 - Tipos de “bode” formados na ponta das ventaneiras (Sartori 2008).

3.7.6 Temperatura

A temperatura de processo tem grande impacto na quantidade de CaO e MgO necessária para saturar a escória durante a fase de redução, conforme estudos mencionados por Choulet et al (1998). Maior quantidade de CaO e MgO é necessária para saturar a escória à medida que a temperatura aumenta. Se as correções necessárias não forem feitas de maneira adequada ocorre dissolução do refratário na linha de escória. Durante o processo as temperaturas se elevam devido as reações exotérmicas de oxidação do cromo, níquel, silício e do carbono (Ver Anexo 2). A temperatura do metal durante o processo pode ser controlada pela temperatura do pré-metal carregado no convertedor, pelo controle de composição química do pré-metal e pela variação de relação O_2 /Gás inerte.

3.7.7 Tempo de Processo

O desgaste do revestimento refratário é minimizado pelo menor tempo de processo da corrida no convertedor. Maior tempo de processo significa maior contato do metal e da escória com o revestimento refratário, acelerando o seu desgaste.

3.8 Lança de Injeção de Oxigênio

A lança de injeção de oxigênio, também chamada de lança de topo é utilizada para transporte e sopro do oxigênio gasoso, sobre o banho metálico. Sua principal função no convertedor AOD-L é maximizar a produção, aumentando a taxa de descarburização nas fases iniciais do processo. Estudos realizados por Scheller et all (1996) e Choulet (1997) demonstraram que o sopro de oxigênio através da lança de topo combinado com o sopro pelas ventaneiras favorece o processo de descarburização, proporcionando redução do tempo de processo da corrida no convertedor.

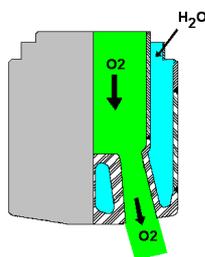
A lança de oxigênio mede cerca de 20 metros e é sustentada por um guincho ou carro de sustentação que permite o seu movimento vertical. A lança está localizada, quando fora da condição de sopro, acima da boca do convertedor e centralizada em relação ao seu centro. A lança pode ser deslocada lateralmente através do movimento do carro de transferência sobre trilhos, permitindo a troca rápida da lança em caso de necessidade operacional. O corpo da lança é constituído por 3 tubos de aço carbono sem costura alinhados concêntricamente. O tubo interno tem a função de transportar o oxigênio, o tubo intermediário e o externo, são utilizados para saída e entrada de água promovendo a refrigeração da lança. Na extremidade superior estão conectadas as mangueiras de oxigênio e água, e na extremidade inferior é soldado o bico da lança.

O bico de lança é fabricado com cobre de alta pureza de alta condutividade térmica. Segundo estudos realizados por Chaves (2006) o projeto do bico da lança é função da vazão de oxigênio, pressão de trabalho, capacidade do convertedor, geometria do convertedor dentre outras variáveis. A Figura 3.24 mostra esquematicamente uma lança de oxigênio, o sistema de refrigeração e o bico da lança de 4 furos.

Visão Geral da Lança



Sistema de Refrigeração



Vista de topo do bico



Figura 3.24 - Desenhos esquemáticos da lança, do sistema de refrigeração e do bico da lança (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).

A lança de topo não penetra no banho metálico, mas por estar próxima do banho e por injetar elevadas quantidades de gases a altas pressões, cria uma depressão na superfície do banho metálico que tem influência no desempenho operacional. Quando a lança é posicionada muito afastada da superfície do banho, parte do oxigênio injetado é perdida, prejudicando a taxa de descarburização e rendimento metálico. Quando a lança está muito próxima ao banho, ocorrem projeções de partículas de aço e escória para fora do convertedor e na região do cone. As projeções, quando aderidas à superfície do cone, causam a redução do diâmetro na região de carregamento. Projeções, quando aderidas na lança, podem causar furos e/ou desgastes excessivos. A Figura 3.25 mostra a grande impregnação de partículas de aço e escória na lança, quando posicionada próxima a superfície do banho. O volume de material projetado para fora do convertedor depende do projeto do bocal da lança de topo utilizada no processo de sopro. O efeito da utilização de lança de topo contendo 1 furo e três furos foi estudado por Fabritius et al (2001). O estudo foi realizado em um modelo a frio simulando um convertedor contendo ventaneiras laterais e sopro com lança de topo. Os experimentos realizados demonstraram maior incidência de projeção quando foi utilizada lança de 1 furo comparado com lança de 3 furos.



Figura 3.25 - Impregnação de metal e escória na lança de injeção de oxigênio (Documento interno ArcelorMittal Inox Brasil).

Grandes impregnações, conforme mostrada na Figura 3.25 podem gerar problemas de agarramento da lança no duto durante o seu trajeto de subida, além de interferir no perfil do jato de oxigênio sobre o banho metálico.

O posicionamento da lança em relação ao banho metálico depende do volume útil do convertedor e do peso de metal contido em seu interior quando carregado. A Figura 3.26 ilustra o sopro de oxigênio pela lança de topo e as projeções de partículas de aço e escória durante o sopro.

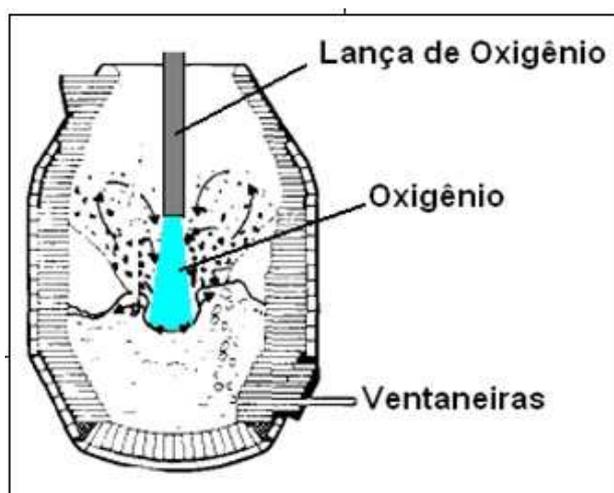


Figura 3.26 – Desenho esquemático do sopro de oxigênio pela lança de topo no convertedor AOD-L (Sartori 2008).

3.9 Teoria Fluido Dinâmico do Jato de Oxigênio

Para se obter as equações que governam o fluxo de oxigênio através do bocal de uma lança, devem ser estabelecidas as condições de contorno, considerando o fluxo de gás unidimensional. Considerar fluxo de gás unidimensional significa adotar a velocidade, temperatura, pressão, densidade etc. como constantes e considerar nos cálculos, o valor médio encontrado em uma seção vertical do duto. Para o fluido do jato de oxigênio deve-se considerar a vazão de gás que percorre o duto como uma constante, e que não ocorre troca de calor para fora ou para dentro do gás durante seu escoamento dentro do duto. Os efeitos de atrito nas paredes do duto devem ser assumidos como desprezíveis. A seguir será avaliado o comportamento e as interações do gás em um duto.

3.9.1 Comportamento do Jato no Bocal

Sob as condições descritas, analisando um reservatório contendo um gás perfeito em condições de estagnação, é possível aplicar a equação de Bernoulli e a partir da equação da continuidade, definir a equação (3.15) para uma seção qualquer do duto da Figura 3.27.

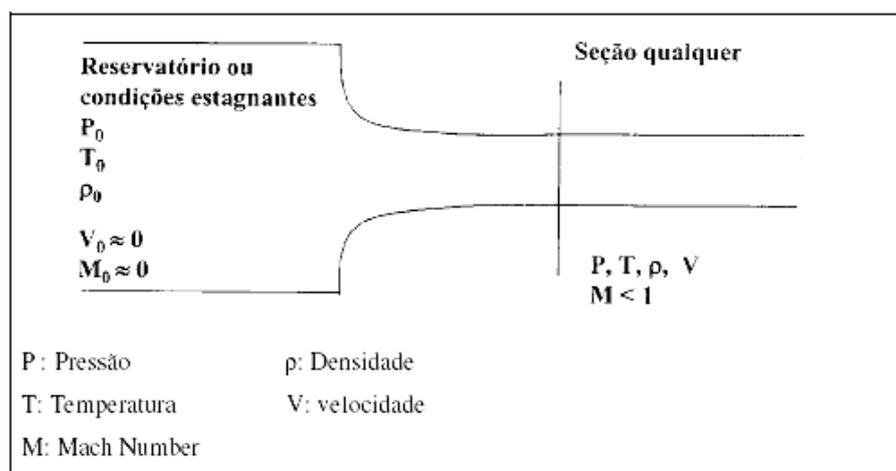


Figura 3.27 - Pontos de referência da estrutura da lança (Martins 2008).

$$\frac{dA}{A} = \frac{dV}{V}(M^2 - 1) \quad (3.15)$$

Sendo:

A: área da seção transversal do duto (cm²);

V: Velocidade (cm/s);

M: “Mach number”, termo utilizado para quantificar a relação entre a velocidade do gás em qualquer posição com a velocidade do som nessa mesma posição, sendo definido pela equação (3.16).

$$M = \frac{V}{a} \quad (3.16)$$

M: Mach number;

V: Velocidade (cm/s);

a: Velocidade do som (cm/s).

Atualmente nas aciarias com sopro de oxigênio pela lança de topo o “Mach Number” pode variar de 1 a 2,35. Os jatos de gases, neste caso oxigênio, podem ser separados em dois grupos: Subsônico e Supersônico. A classificação do jato depende da velocidade do gás na saída do bocal da lança, que pode ser maior ou menor que a velocidade do som. No caso do oxigênio a 27°C, a velocidade crítica ou velocidade do som é 32.000 cm/s e aumenta com a raiz quadrada da temperatura.

Analisando a equação 3.15, para um escoamento subsônico, com $M < 1$, um valor de dV/V positivo, é possível quando o valor de dA/A for negativo. Neste caso, para um aumento da velocidade, é necessária uma diminuição da área da seção do bocal. Para $M=1$ o valor de dA deve ser igual a 0, o que significa atingir a área de seção mínima. Quando $M > 1$, valores positivos de dV ocorrerão somente se dA for positivo, sendo necessário neste caso, aumentar a seção de saída para obter aumento de velocidade do fluxo.

Para se obter um escoamento supersônico de um fluxo, sempre dentro das condições iniciais assumidas, deve-se conduzir o gás, através de um duto convergente, e a seguir por um duto divergente, segundo estudos mencionados por Martins (2008).

3.9.2 Comportamento do jato fora do bocal

A teoria apresentada anteriormente pode ser aplicada, com certas considerações, quase que diretamente em cada bocal de lança de oxigênio, porém o comportamento do jato de oxigênio após deixar o bocal é sujeito a incertezas, em função das interações com a atmosfera que circundam o jato.

Estas interações reduzem velocidades supersônicas de gases para sônicas e subsônicas, portanto, faz-se necessário analisar o comportamento de jato subsônico, para melhor entendimento do comportamento do jato supersônico.

Imediatamente ao deixar o bocal, o jato subsônico entra em contato com o meio ambiente e as camadas mais extremas interagem, havendo transferência de condições térmicas e massa. As forças tangenciais entre o meio ambiente e o jato promovem arrastes de uma maior quantidade de gases do ambiente para dentro do jato causando um aumento de massa e conseqüente redução de velocidade ao longo do tempo. A interação entre os dois meios ocorre nas interfaces, promovendo um gradiente de velocidade, temperatura e massa como um perfil de distribuição normal em relação à linha de centro do jato. A configuração descrita é representada na Figura 3.28, esquematicamente subdividida em 3 regiões.

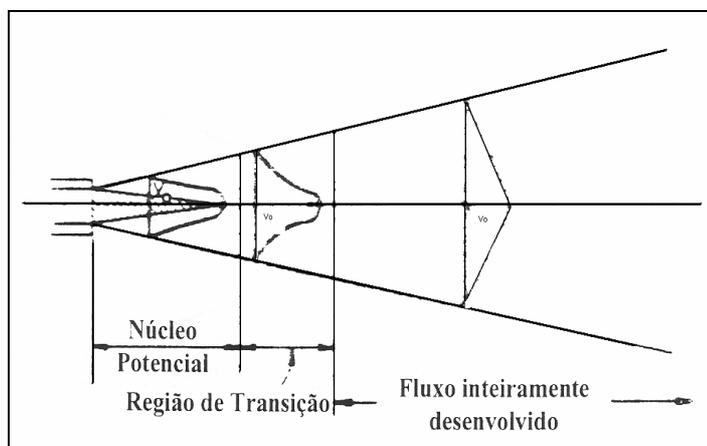


Figura 3.28 - Representação esquemática das regiões presentes ao longo do fluxo (Martins 2008).

Na região inicial de núcleo potencial, com distância correspondente de 3 a 7 vezes o diâmetro externo do bocal, a velocidade no centro do jato permanece inalterada, com valor igual à velocidade de saída do bocal. Após a região de núcleo potencial, tem-se pequena região de transição, vindo a seguir uma região de fluxo totalmente desenvolvido, contendo perfis de velocidade iguais em relação a outras seções transversais no centro do jato.

Analisando o comportamento de jatos supersônicos, verificam-se analogias em relação ao núcleo potencial de jatos subsônicos. A velocidade axial do jato também permanece constante, porém neste caso supersônico.

Na região de núcleo potencial, a velocidade no centro do jato decresce, mantendo-se maior do que a velocidade do som. Esta região, com velocidade axial do jato maior do que a velocidade sônica é denominada cone supersônico que inclui o núcleo potencial, conforme apresentado na Figura 3.29. Além do cone supersônico, encontra-se uma região subsônica, similar à região de fluxo totalmente desenvolvida em um jato subsônico.

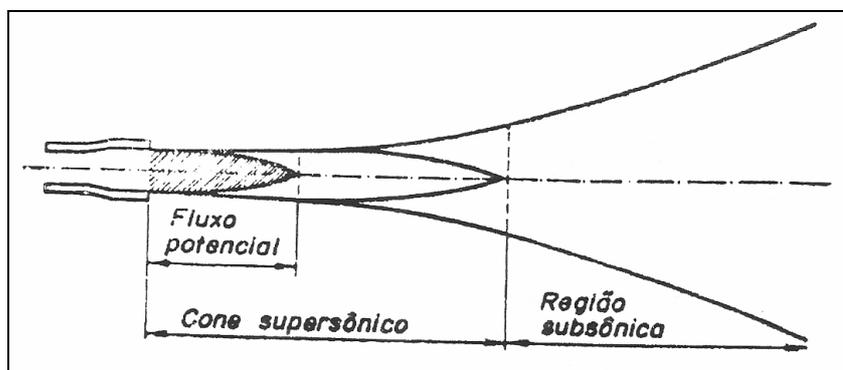


Figura 3.29 - Representação esquemática das regiões no jato supersônico (Martins 2008).

Nos trabalhos realizados por Anderson et all (1995) e citado por Martins (2008) foi determinada a relação entre a velocidade de saída do bocal (em termos de “Mach number”) e o comprimento do cone supersônico (em termos da distância a partir da saída do bocal e os diâmetros da garganta e saída do bocal) conforme mostrado na Figura 3.30.

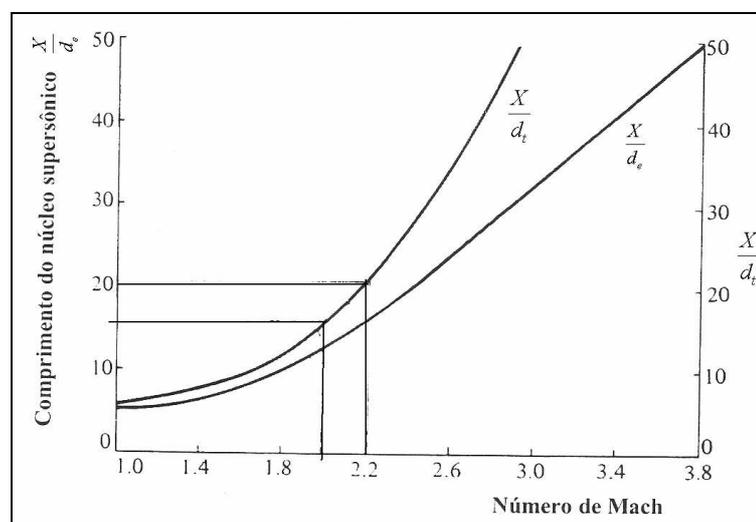


Figura 3.30 - Relação entre o comprimento do núcleo supersônico e o número de Mach (Anderson et all 1995) citado por (Martins 2008).

Para jatos supersônicos, a pressão de impacto do centro do jato foi correlacionada por Flinn (1967) e citada por Martins (2008), como uma função da distância a partir da saída do bocal como ilustrado na Figura 3.31.

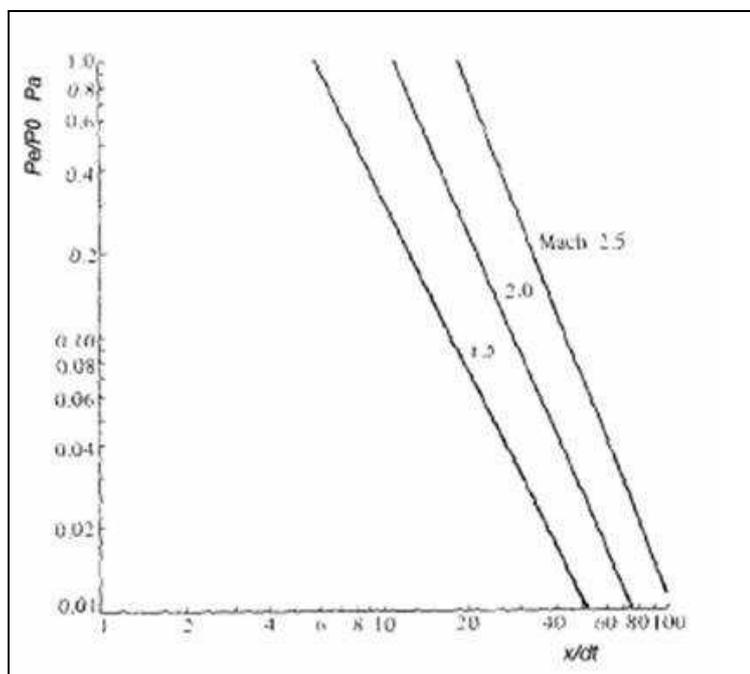


Figura 3.31 - Pressão máxima de impacto em função do número de Mach e a distância até a ponta da lança (Flinn 1967) citada por (Martins 2008).

Pode-se considerar natural, em todo escoamento supersônico, o surgimento de ondas de choque, resultantes de alterações na pressão ou da direção dos gases. Em função da diferença de pressão entre o jato na saída do bocal e a pressão do ambiente circundante ao jato, ocorre um processo de ajuste, estabelecido por uma série de choques entre massas. Estas ondas de choques aumentam os componentes da velocidade perpendicular ao eixo do jato, proporcionando perdas em relação à energia útil disponível.

Quando a pressão do jato na saída do bocal é menor que a pressão atmosférica, há uma imediata contração no sentido de equalização das pressões, caracterizando um caso de jato super expandido como ilustrado Figura 3.32c. Por outro lado, se a pressão do jato for maior que a pressão atmosférica, haverá uma imediata expansão do jato, dando origem a ondas de choque, de maior intensidade se comparado ao caso anterior, caracterizando um caso de jato sub-expandido Figura 3.32a.

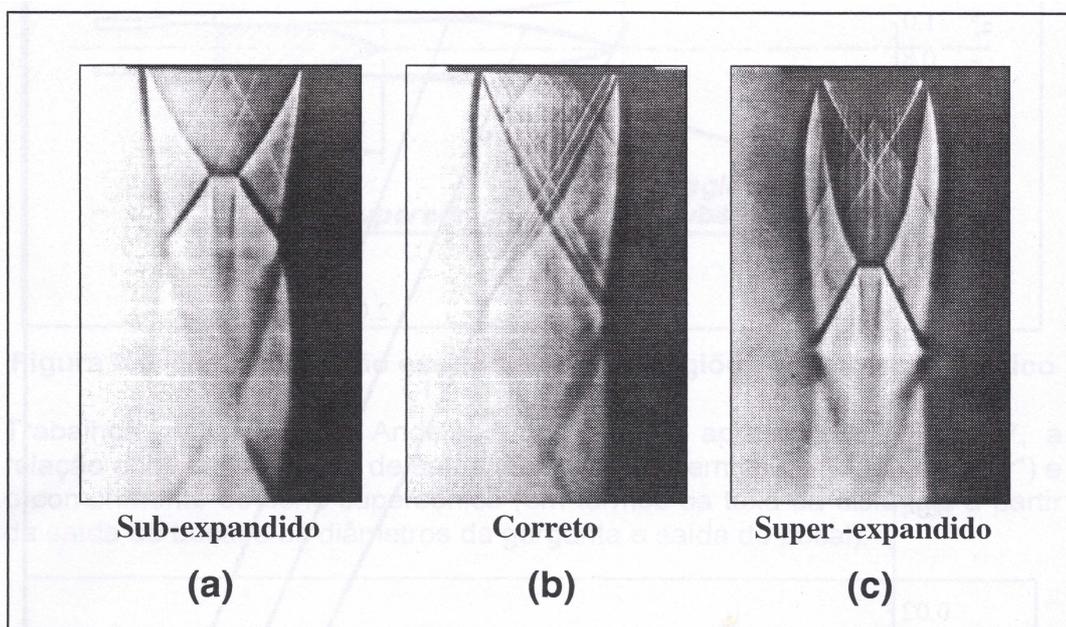


Figura 3.32 - Quadro de fotografias do jato de ar de 94 psi (Glass 1974) citada por (Martins 2008).

3.9.3 Interação do Jato com o Banho Metálico

O impacto do jato sobre a superfície do banho metálico transfere energia cinética para o banho, causando uma depressão em sua superfície. Esta depressão pode ser medida por dois parâmetros, a profundidade da depressão, medida no centro do convertedor e representado na Figura 3.33 por L e o diâmetro da deformação representado por D_0 , ambas mediadas considerando o banho estático. O parâmetro L_0 representa a profundidade do banho estático e D diâmetro do banho. A superfície deformada, não é estável e oscila no sentido vertical de forma cíclica com rotações. O local de impacto do jato para dentro do banho, onde o oxigênio reage, pode ter temperaturas que chegam a 2300 °C segundo citação de Martins (2008). Com a evolução do tempo de sopro, a formação da fase espumosa, envolve o jato, alterando suas características quando comparado com o início do refino.

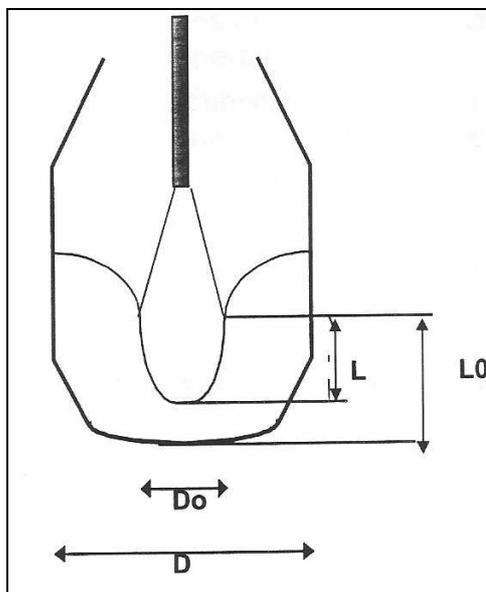


Figura 3.33 - Deformação do banho formada pelo impacto do jato de oxigênio em convertedor (Martins 2008).

Para cálculo da intensidade de deformação, vários desenvolvimentos matemáticos, foram elaborados, sendo que dois modelos citados por Martins (2008) podem ser ressaltados.

O índice do padrão de sopro B-Z, calculado pela equação (3.17).

$$B - Z = \frac{Q / nf}{(d_t / 10) \times [(L + h) / 10]} \quad (3.17)$$

Q: Vazão (Nm³/h);

nf: Número de furos;

dt: Diâmetro da seção crítica (mm);

L: Profundidade de penetração do jato de O₂ (mm);

h: Altura da lança em relação ao banho (mm).

Em que, L é a profundidade da concavidade resultado da equação (3.18).

$$L = \left[\frac{0,64Q / nf}{(d_t / 10) \times (h / 10)^{1/2}} - 3,6 \right] \times 10 \quad (3.18)$$

Onde,

- Q: Vazão (Nm³/h);
 nf: Número de furos;
 dt: Diâmetro da secção crítica (mm);
 h: Altura da lança em relação ao banho (mm).

Geralmente valores de L entre 8 e 9 são considerados ideais, abaixo de 8 sopra macio e por outro lado acima de 9 sopra duro. Por não contemplar o ângulo do bocal em relação ao eixo, o modelo descrito acima se torna limitado.

Outro modelo matemático, talvez o mais utilizado pela maioria dos aciaristas, foi desenvolvido pelo corpo técnico da Nippon Steel, avaliando a força do impacto, através do cálculo da profundidade de penetração (L) em relação ao nível do banho estático (L₀) representado pela equação (3.19).

O valor de L é dado por:

$$L = L_{h_0} \cdot \exp(-0,78h / L_{h_0}) \quad (3.19)$$

- L: Profundidade de penetração do jato de O₂ (mm);
 L_{h0}: Profundidade do banho parado (mm);
 h: Altura da lança em relação ao banho (mm).

$$L_{h_0} = 63 \left(\frac{Q}{d_t} \right)^{2/3} \quad (3.20)$$

- Q: Vazão (Nm³/h);
 dt: Diâmetro da secção crítica (mm).

O valor de dt “diâmetro da secção crítica” na equação (3.20) no caso da lança multi furos, deve ser substituído por um diâmetro equivalente em função do número de furos, do

diâmetro da garganta e do ângulo de inclinação do furo. O cálculo do diâmetro equivalente é obtido pela equação (3.21).

$$d_{eq} = nf \left(\frac{d_i}{k_n} \right) \quad (3.21)$$

Onde:

nf: Número de furos;

Kn: Coeficiente de correção para inclinação dos bocais.

O índice Kn é obtido pela Figura 3.34 para bocais contendo 3, 4 e 5 furos.

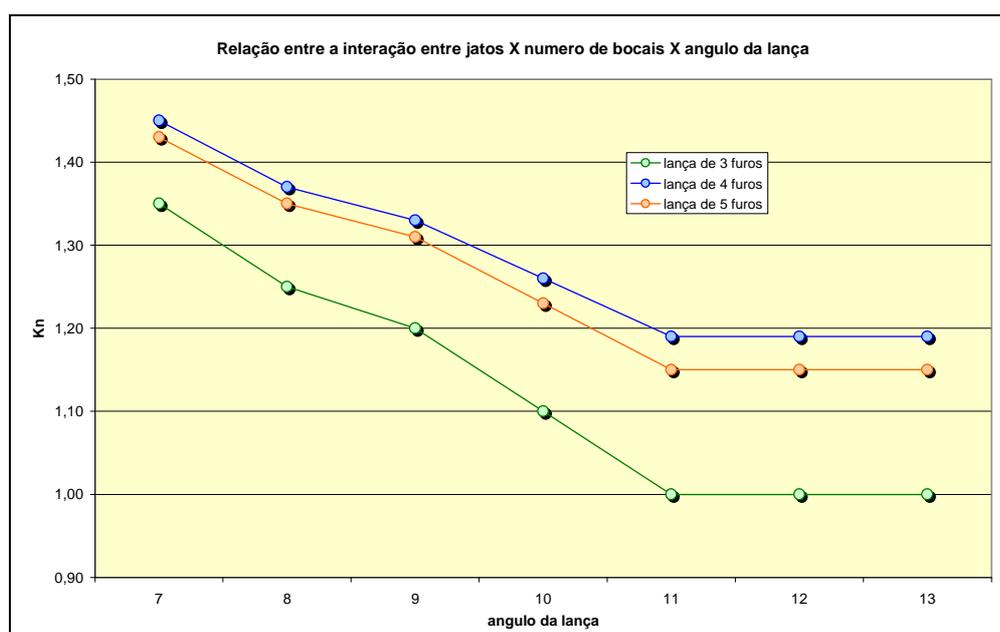


Figura 3.34 – Relação entre a interação do jato em relação ao número de bocais e ângulo da lança utilizado no cálculo do diâmetro equivalente dos bocais (Martins 2008).

Valores para (L/L_0) na faixa 0,6 a 0,7 caracterizam sopro macio e na faixa de 0,9 a 1,1 sopro duro.

3.10 Projeto do Bocal de Lança

A vazão de sopro é considerado o ponto de partida para definição de um projeto de bico de lança de oxigênio. No projeto devem ser consideradas a vazão requerida para otimização dos tempos operacionais, adequada para as dimensões do convertedor e estarem de acordo com a pressão da linha de gás. Com o aumento do tamanho dos convertedores, gerou-se a necessidade de aumentar as vazões de oxigênio. A opção de lanças com um único bocal não comprometeriam o tempo de mistura e não afetariam as relações de refino, entretanto, elevadas vazões em um único bocal forneceriam altas pressões de impacto. Altas pressões sobre o banho metálico promovem excessivas penetrações no banho metálico, que resultariam em excessivas projeções, além de riscos de desgaste acentuado na sola do convertedor.

A solução experimental encontrada foi a utilização de lanças com vários furos. A complexidade das interações entre jatos, não permitiu até a presente data, uma teoria consagrada, mas estudos realizados por Anderson et al (1995) e citados por Martins (2008) permitiram correlacionar os parâmetros relacionados com as interações dos jatos de oxigênio, e se tornou uma base para desenvolvimentos práticos. Deve ser enfatizado que as discussões anteriores a respeito das equações que governam o fluxo de oxigênio através de um bocal e do comportamento do jato fora do bocal são válidas e podem ser aplicadas para cada orifício de uma lança contendo vários furos.

Uma regra mundialmente aceita, formulada com base em experiências operacionais em varias plantas, é projetar lanças considerando as vazões distribuídas nos orifícios e obter valores de vazão de sopro de 70 a 200 Nm³/min. As vazões de sopro são correlacionadas com a capacidade do convertedor como mostrado na Figura 3.35.

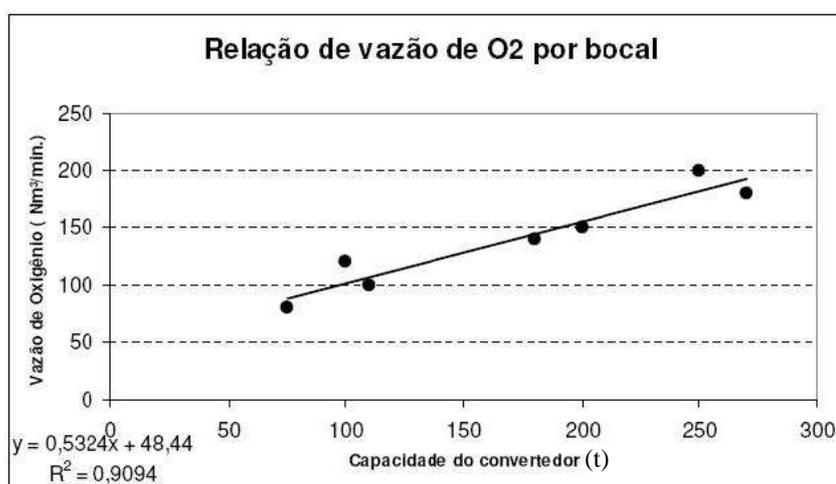


Figura 3.35 - Relação entre vazão de oxigênio com a capacidade do convertedor (Anderson et all 1995) citado por (Martins 2008).

A região ao redor de cada jato individualmente apresenta uma tendência de arraste de ar. Esta tendência provoca uma redução da pressão na região entre os jatos, conseqüentemente levando cada jato em direção ao outro, que converge em direção ao eixo central da lança. Esta tendência é maior quando a separação entre os jatos diminui, ou o ângulo de inclinação em relação ao centro do jato for menor. Em contra partida, grandes inclinações reduzem a penetração do jato, podendo direcionar os jatos de oxigênio sobre as paredes do convertedor.

O efeito da inclinação do ângulo na saída do bocal da lança de sopro foi estudada por WANG et all (2010) em um modelo tri-dimensional. Para um bocal de lança contendo 4 furos foi estudado o efeito da variação do ângulo de saída do bocal de 10°, 12° e 14°. O estudo concluiu que a interação entre os jatos na saída do bocal aumenta à medida que o ângulo de inclinação da saída do bocal diminui. Como esperado, o “much number” na saída do bocal é maior para os três casos e decresce à medida que a distância da saída do bocal aumenta, passando de supersônico para subsônico. A Figura 3.36 ilustra a interação entre os jatos e a transição do jato supersônico para subsônico, para o exemplo em que o ângulo de inclinação é de 12°.

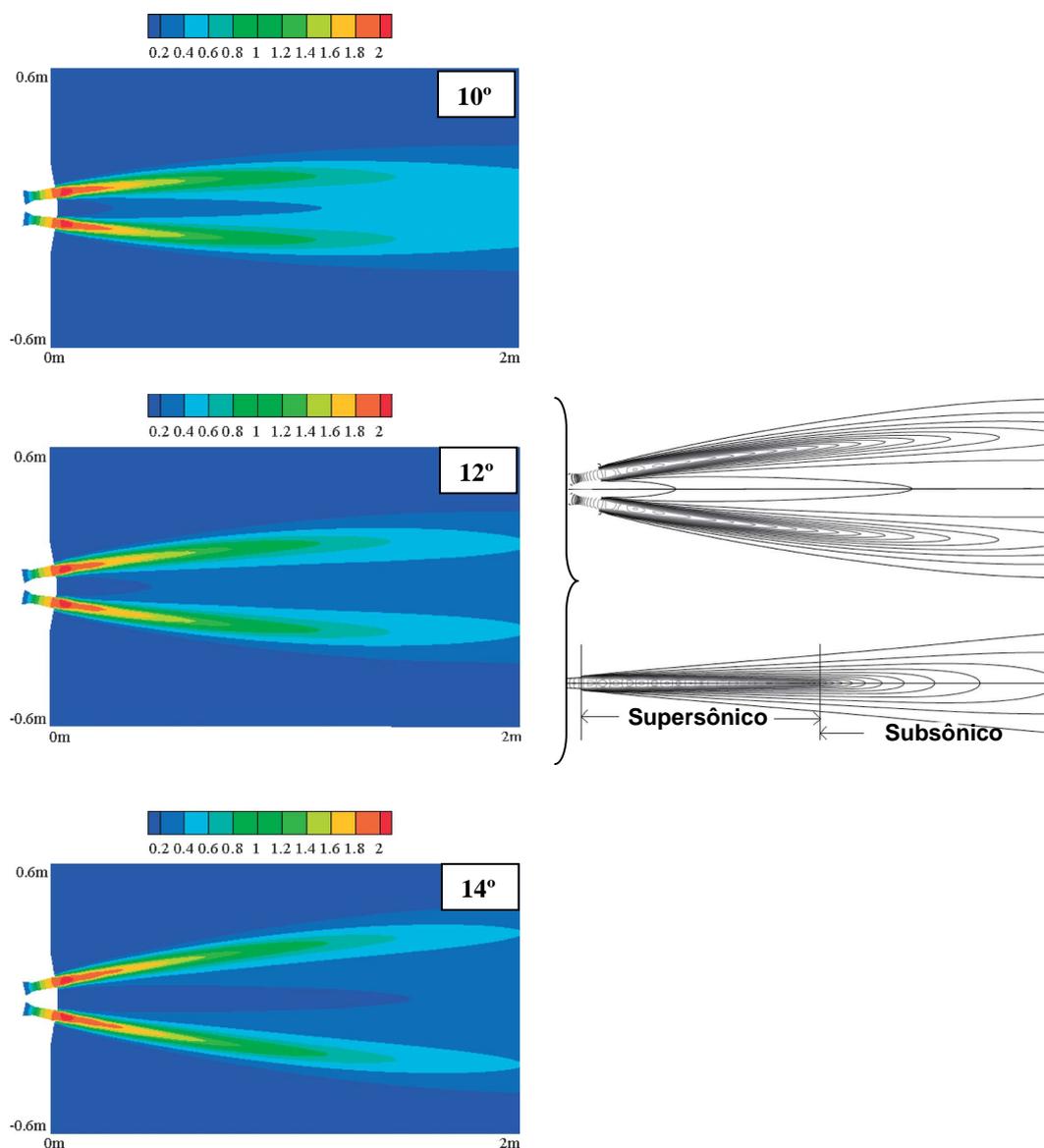


Figura 3.36 - Interação entre os jatos de O_2 soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 10° , 12° e 14° respectivamente (WANG et al 2010).

O efeito do ângulo de inclinação na saída do bocal nas componentes de velocidade a 1 metro do bocal é ilustrado na Figura 3.37. À medida que o ângulo de inclinação do bocal aumenta, observa-se menor interação entre os jatos e menor componente de velocidade no centro geométrico de cada bocal. Fixado o ângulo de inclinação na saída do bocal em 12° e variando a distância da saída do bocal em 0,8 m, 1,2 m e 1,6 m observa-se um decréscimo

de velocidade à medida que a distância do bocal aumenta, como mostrado na Figura 3.38, caracterizando a mudança do jato de supersônico para subsônico.

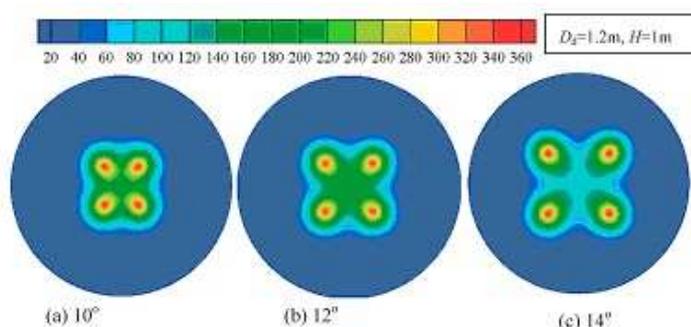


Figura 3.37 - Mapas de velocidade dos jatos de O₂ soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 10°, 12° e 14° respectivamente (WANG et all 2010).

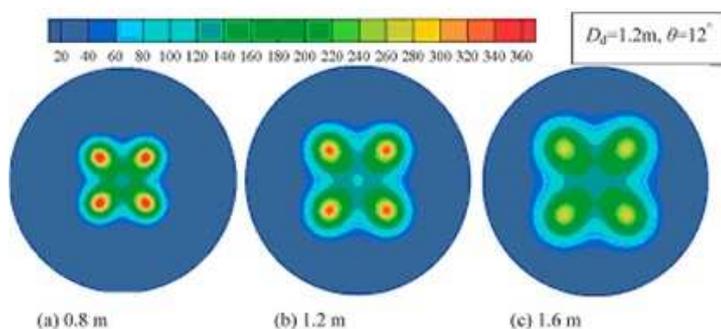


Figura 3.38 - Mapas de velocidade dos jatos de O₂ soprado na lança de topo para inclinação do ângulo na saída do bocal de 12° e altura da lança com relação ao banho metálico de 0.8 m, 1,2 m e 1,6 m respectivamente (WANG et all 2010).

Baseado em modelos fluido dinâmicos e confirmados em modelo a frio, Tago et all (2003) estudaram o efeito na pressão de sopro para ângulos de inclinação na saída do bocal de 10, 20 e 30°. Os dados ilustrados na Figura 3.39 são similares aos encontrados por WANG et all (2010) com menor interação entre os valores de velocidade à medida que o ângulo de inclinação aumenta.

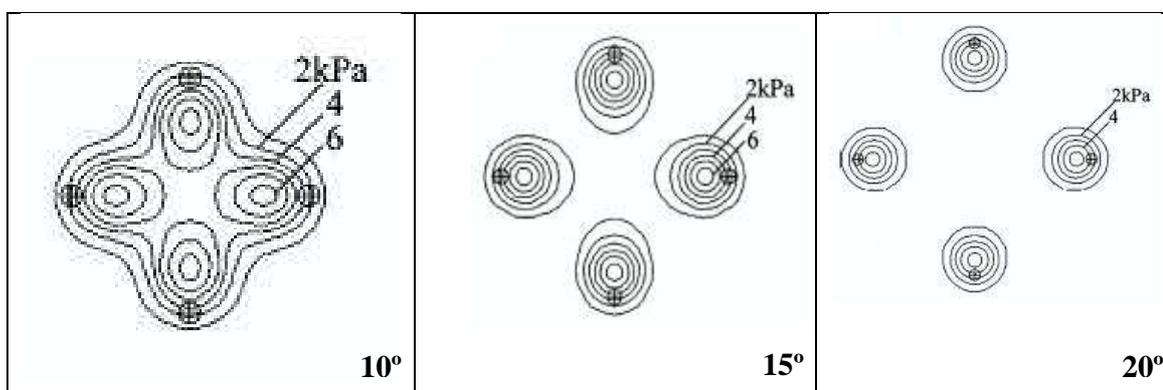


Figura 3.39 - Representação dos mapas de contorno da pressão dinâmica para bocal de lança contendo 4 furos e ângulo de inclinação do bocal de 10°, 15° e 20° respectivamente (Tago et all 2003).

Fixada a distância do bocal em relação ao banho em 3 m e ângulo da saída do bocal em 20°, foi estudado o efeito do aumento do número de furos de 4 para 6 na pressão dinâmica de sopro de oxigênio. Os resultados mostraram que existe uma maior concentração da pressão de sopro em cada bocal com a redução do número de furos como mostrado na Figura 3.40.

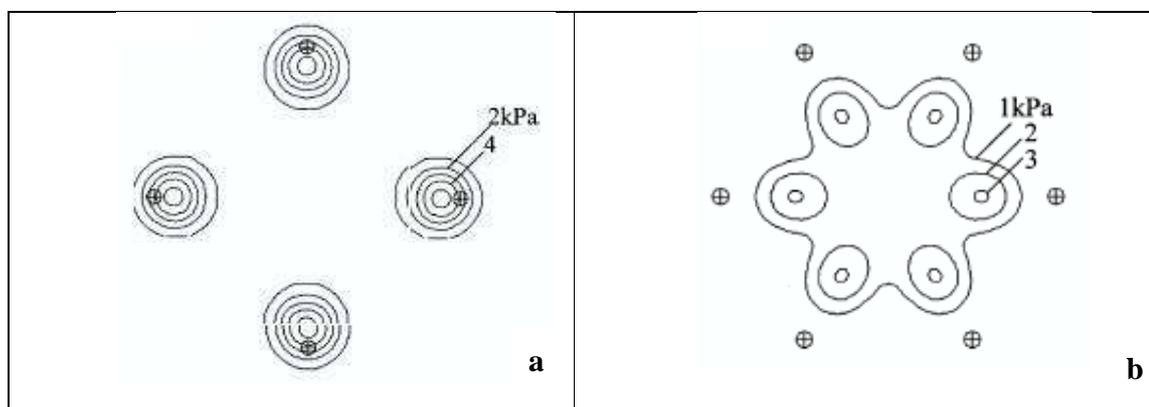


Figura 3.40 - Representação dos mapas de contorno da pressão dinâmica para bocal de lança com inclinação do bocal de 20° e lança contendo a) 4 e b) 6 bocais respectivamente (Tago et all 2003).

3.10.1 Projeto do Bocal da Lança de 3 Furos

O projeto e fabricação do bocal da lança de 3 furos foi realizado pela empresa Alemã, Impact e contou com participação dos engenheiros da ArcelorMittal Inox Brasil durante o seu desenvolvimento.

Para definição das dimensões geométricas do bocal da lança de 3 furos foram consideradas algumas referências bibliográficas deste trabalho além do perfil de desgaste refratário do convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil e da experiência da empresa Impact no fornecimento de lança para outras empresas produtoras de aço inoxidável.

Objetivou-se com o novo projeto da lança de 3 furos, promover uma combinação entre os gases soprados pela lança de topo com os gases soprados pelas ventaneiras que fosse favorável ao processo de descarburação, com menor oxidação de cromo e que estivesse alinhado com o menor desgaste refratário.

Para uma maior interação entre os jatos na saída do bocal e obtenção de um sopro mais concentrado sobre o banho metálico, a lança de 3 furos foi dimensionada considerando um ângulo de abertura entre os bocais de 9° . Além da redução do ângulo de saída entre os bocais o diâmetro de entrada e diâmetro de saída dos bocais foram modificados.

O desenho do bico da lança de 3 furos com algumas informações dimensionais está ilustrado na Figura 3.41. A Tabela II mostra as principais modificações realizadas no projeto do bocal da lança de 3 furos comparado com a lança de 4 furos.

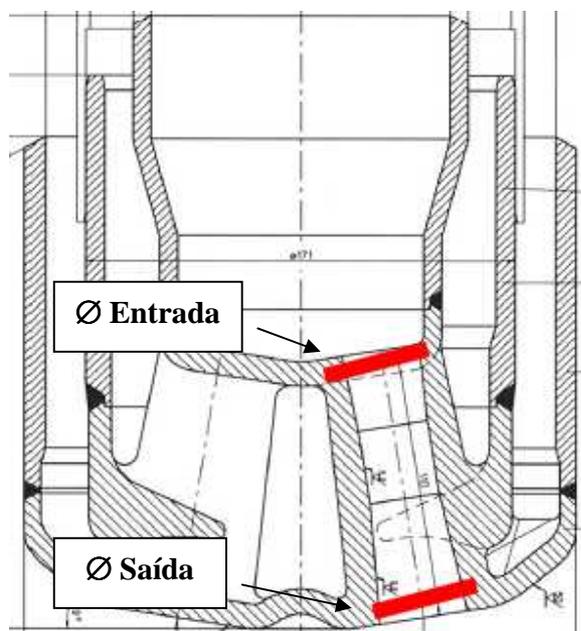


Figura 3.41 – Desenho esquemático do bico da lança de 3 furos.

Tabela II – Configuração geométrica e parâmetros de trabalho da lança de 3 e 4 furos.

	Lança 4 Furos	Lança 3 Furos
Diâmetro Entrada (mm)	22,8	30
Diâmetro Saída (mm)	30	36
Inclinação do Bico	16°	9°

4 METODOLOGIA

O número de variáveis metalúrgicas e de processo que têm influência nos resultados de produção de aço inoxidável em convertedor AOD-L é muito grande, sendo em alguns casos, difícil identificar qual a variável causou algum resultado insatisfatório. Faz-se necessário então, definir as condições de contorno durante a avaliação dos resultados experimentais, buscando eliminar a interferência das variáveis inerentes ao processo.

No caso da ArcelorMittal inox Brasil, há diferentes rotas de produção para o aço inoxidável em função da origem do pré metal e dos processos subseqüentes após o vazamento do convertedor AOD-L, conforme já mencionado na revisão bibliográfica deste trabalho. Além das diferentes rotas, o pré-metal apresenta grande variação em sua composição química e peso carregado no convertedor, e por isso devem ser consideradas na avaliação dos experimentos.

Buscando atingir o objetivo deste trabalho a metodologia foi dividida em 2 etapas:

1. Parte teórica
 - Configuração do bico da lança de 3 furos.
 - Definição das variáveis respostas.
2. Parte Experimental
 - Desenvolvimento do plano de experiência.
 - Coleta de dados utilizando a lança de 3 furos.

4.1 Parte Teórica

4.1.1 Configuração do Bico da Lança de 3 furos

As dimensões geométricas da lança de 3 furos foram definidas com base na revisão bibliográfica e objetivos deste trabalho. As principais modificações e alguns parâmetros geométricos do bocal da lança de 3 furos estão descritos no item 3.10.1 da revisão bibliográfica.

4.1.2 Definição das Variáveis Respostas

As variáveis respostas foram definidas considerando o objetivo deste trabalho. As variáveis escolhidas foram:

- Consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ (kg/t);
- CTT (Tempo de processo da corrida);
- Consumo específico de oxigênio (Nm^3/t);
- Consumo específico de argônio (Nm^3/t);
- Eficiência de dessulfuração.

A quantidade de FeSi (kg/t) adicionado na fase de redução mede indiretamente a oxidação dos metais durante o processo e são calculados conforme descrição do Anexo 3. A relação do consumo de ferro-silício com a oxidação de cromo é direta, ou seja, quanto maior for a oxidação do cromo maior é o consumo de FeSi na fase de redução.

Durante o processo de produção de aço inoxidável, ligas de Cromo, Níquel, Manganês etc... são adicionadas no convertedor para acerto da composição química requerida. O percentual de material metálico adicionado no convertedor, na fase sólida, é chamado de buid-up, calculado pela equação 4.1.

$$\text{Buid} - \text{Up} = \left[\left(\frac{\text{PesoAçoVazado}}{\text{PesoPRéMetalCarregado}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Maior aporte térmico para fusão e aquecimento das ligas carregadas é necessário quando se tem um maior buid-up. O aporte térmico necessário é obtido pelo maior sopro de oxigênio, que intensifica a reação exotérmica de oxidação do cromo. O cromo oxidado, que compõe a escória de processo, é reduzido na fase de redução através da maior adição de FeSi .

Objetivando eliminar a interferência da variável de processo “buid-up” (entrada de carga sólida no convertedor) que tem efeito no consumo de FeSi na fase de redução, foi definida a relação $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ em substituição à variável resposta consumo $\text{FeSi}_{\text{redução}}$ (kg/t), para avaliação do efeito de sopro com a lança de 3 furos na oxidação do banho.

A eficiência de dessulfuração foi calculada pela equação 4.2.

$$Ef.D. = \frac{(\% S_{iniAOD} - \% S_{finAOD})}{\% S_{iniAOD}} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

$Ef.D$ – Eficiência de Dessulfuração no AOD-L;

$\% S_{ini}$ – Teor de enxofre inicial no AOD-L (%);

$\% S_{fin}$ – Teor de enxofre final no AOD-L (%).

Para avaliar o desempenho operacional do convertedor AOD-L utilizando a lança de 3 furos foram produzidas corridas processadas na rota FEA-PTG e FEA-FEA que utilizaram processo duplex.

Os experimentos foram realizados no aço P304 que representa aproximadamente 40% da produção total de aço inoxidável na ArcelorMittal Inox Brasil.

Os resultados experimentais foram comparados com os resultados das corridas processadas utilizando lança de 4 furos, produzidas na sequência, após as corridas experimentais utilizando lança de 3 furos.

As condições operacionais não foram modificadas durante os experimentos, com exceção das variações naturais inerentes ao processo, que apresentou pequenas variações de composição química do pré-metal carregado. Os padrões operacionais para controle dos gases de processo soprados pela lança de topo e ventaneiras foram mantidos constantes em todas as corridas experimentais utilizando lança de 3 e 4 furos (Ver exemplos no Anexo 4 e Anexo 5). Todas as corridas experimentais que tiveram alguma variação anormal de processo sejam por problemas de manutenção, problemas operacionais ou por variação atípica de composição química e quantidade de pré-metal carregado foram excluídas da análise.

Para este estudo, a posição da lança de 3 furos foi definida conforme descrito na Figura 4.1, em que 2 dos 3 furos ficaram localizados em oposição ao lado das ventaneiras.

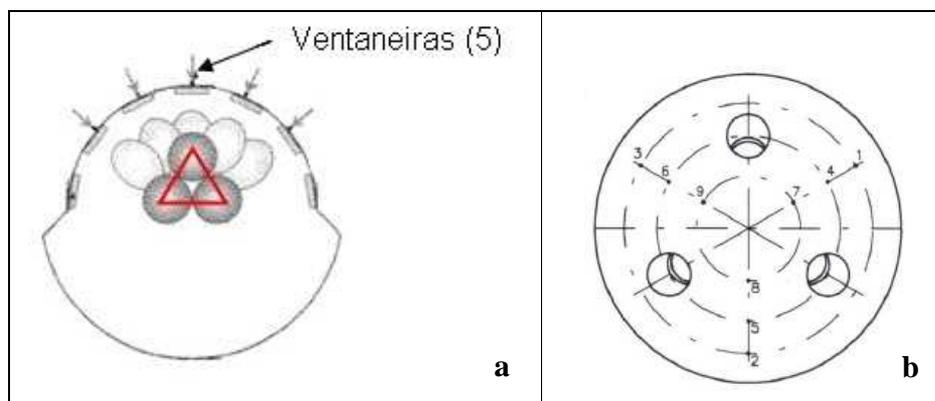


Figura 4.1- Posição de sopro da lança de 3 furos nos experimentos realizados vista superior do convertedor (a) e bocal da lança de furos (b).

4.2 Parte Experimental

4.2.1 Desenvolvimento do Plano de Experiência

O plano de experiência foi elaborado considerando a norma técnica da ArcelorMittal Inox Brasil. A norma destaca que para qualquer modificação, de alguma variável de processo, deve ser elaborado um plano de experiência aprovado pelos engenheiros e gerente de metalurgia com o objetivo de garantir a qualidade do produto final. Para este estudo foi elaborado um plano de experiência contendo os principais controles e o planejamento gradativo das corridas experimentais utilizando lança de 3 furos. A continuidade dos experimentos foi condicionada e limitada à aprovação de qualidade do produto final.

4.2.2 Coleta e Preparação dos Dados

Os dados experimentais foram coletados e armazenados em uma planilha eletrônica para avaliação estatística utilizando o software Minitab.

As variáveis coletadas para gerar as variáveis respostas deste trabalho foram:

- CTT (Tempo de processamento da corrida no AOD-L – Charge-to-tap);
- Build-Up (entrada de carga sólida no convertedor AOD-L);
- Consumo de FeSi na fase de redução;

- Consumo específico de oxigênio (Nm^3/t);
- Consumo específico de argônio (Nm^3/t);
- Eficiência de dessulfuração no AOD-L (% de dessulfuração).

Os dados experimentais foram analisados buscando verificar a existência de algum erro grosseiro no banco de dados ou alguma anormalidade durante o processamento da corrida. Os erros que, em valores absolutos, fossem maiores que os demais valores, foram considerados como um ponto extremo conhecido como “outlier”.

Utilizou-se o gráfico “box-plot” gerado pelo software Minitab para apurar os resultados obtidos com a lança de 3 furos em comparação com a lança de 4 furos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi proposto no plano de experiência a realização de experimentos utilizando a lança de 3 furos na produção do aço inoxidável austenítico P304A nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG.

5.1 Análise dos Resultados

As avaliações estatísticas foram aplicadas em 140 corridas experimentais das quais 60 foram realizadas na rota FEA-FEA e 80 na rota FEA-PTG. Os resultados experimentais utilizando lança de 3 e 4 furos foram comparados utilizando gráficos “Box Plot”. As avaliações dos resultados foram divididas em dois grupos: Rota FEA-FEA e rota FEA-PTG

5.1.1 ROTA FEA-FEA

5.1.1.1 Consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$

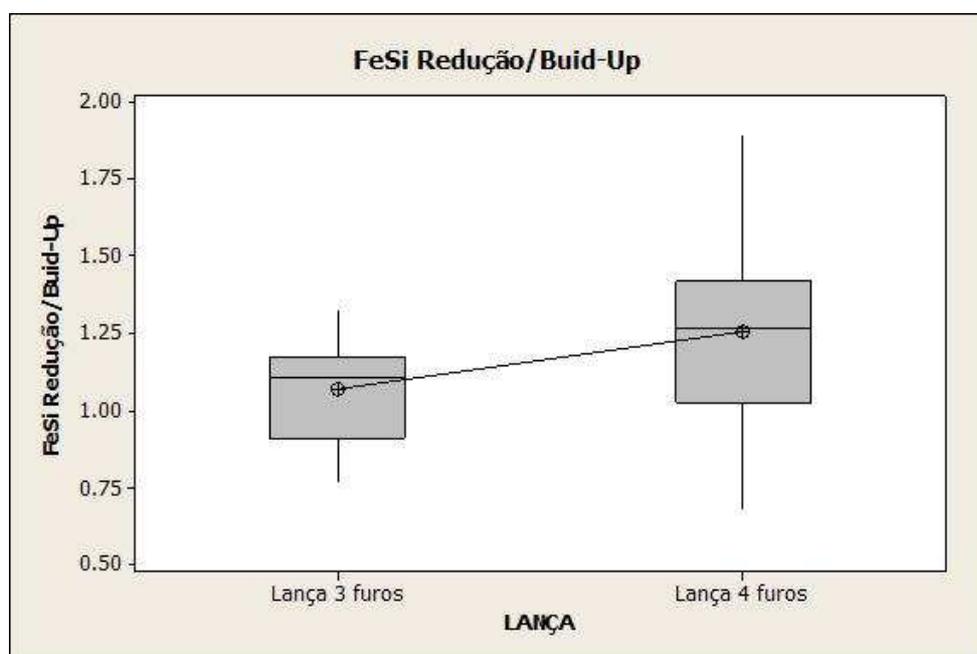


Figura 5.1 - Box-Plot da relação do consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	30	1.067	0.160	0.029
Lança 4 furos	30	1.256	0.296	0.054

5.1.1.2 Tempo de processo - Charge-to-Tap (minutos)

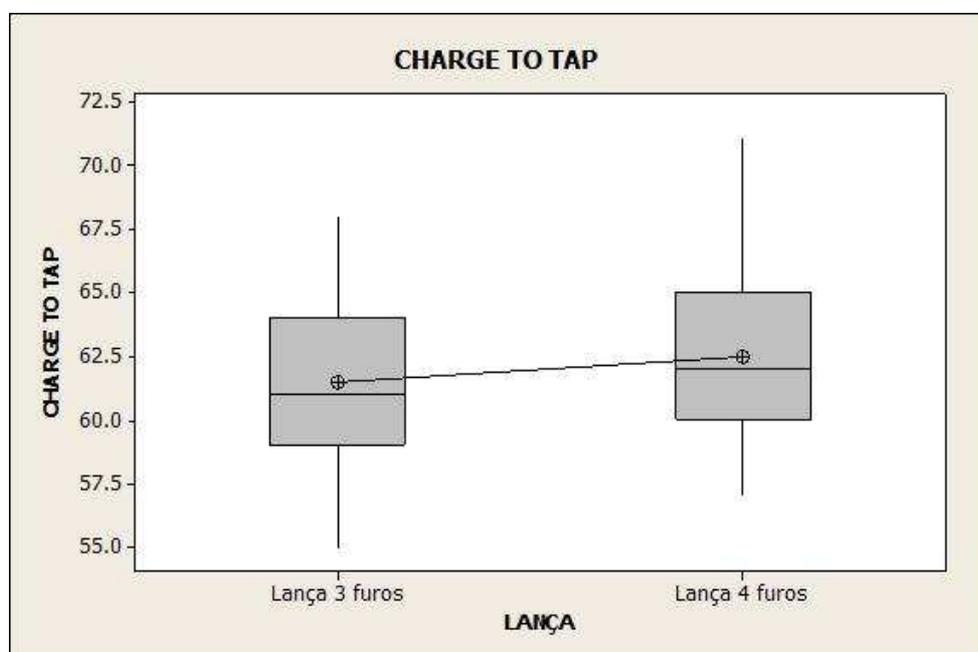


Figura 5.2 - Box-Plot do tempo de processo utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	27	61.48	3.54	0.74
Lança 4 furos	28	62.48	3.80	0.73

5.1.1.3 Consumo de Oxigênio (Nm³/t)

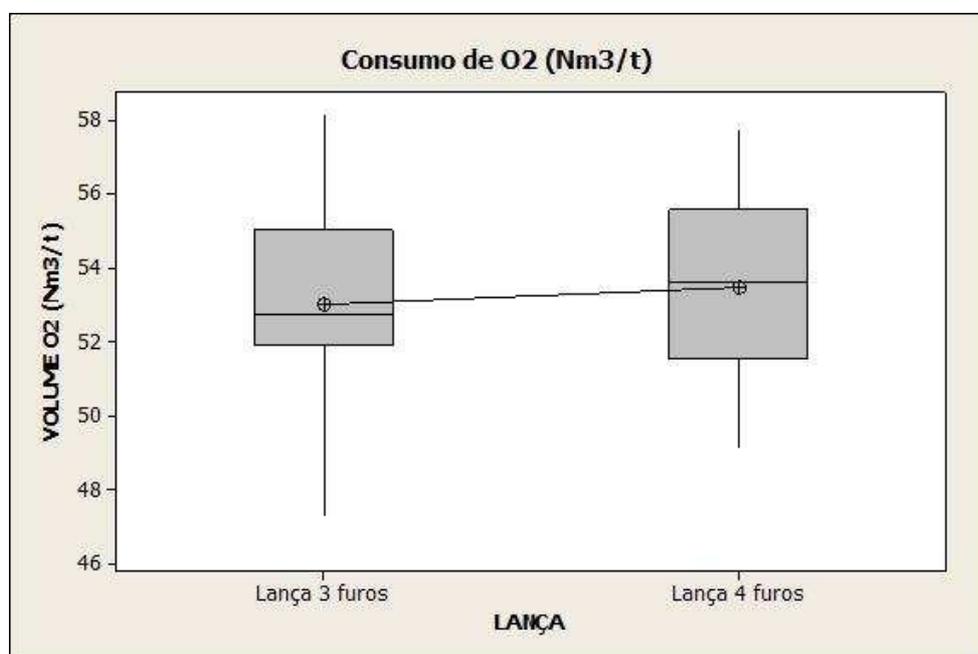


Figura 5.3 - Box-Plot do consumo de oxigênio (Nm³/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	27	53.03	2.69	0.52
Lança 4 furos	30	53.48	2.51	0.46

5.1.1.4 Consumo de Argônio (Nm^3/t)

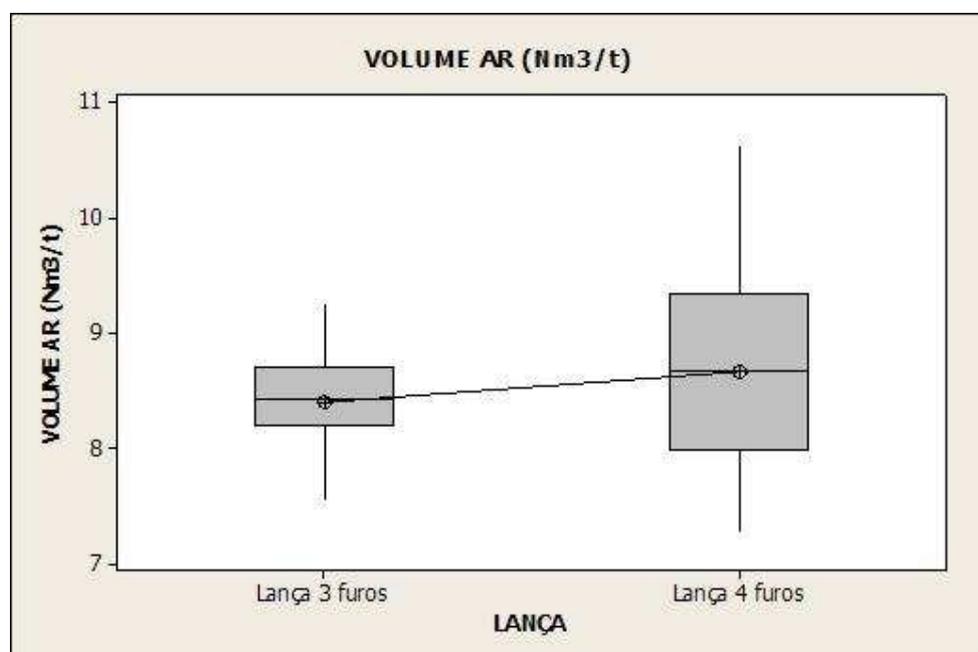


Figura 5.4 - Box-Plot do consumo de argônio (Nm^3/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	27	8.404	0.386	0.077
Lança 4 furos	28	8.660	0.886	0.17

5.1.1.5 Eficiência de Dessulfuração (%)

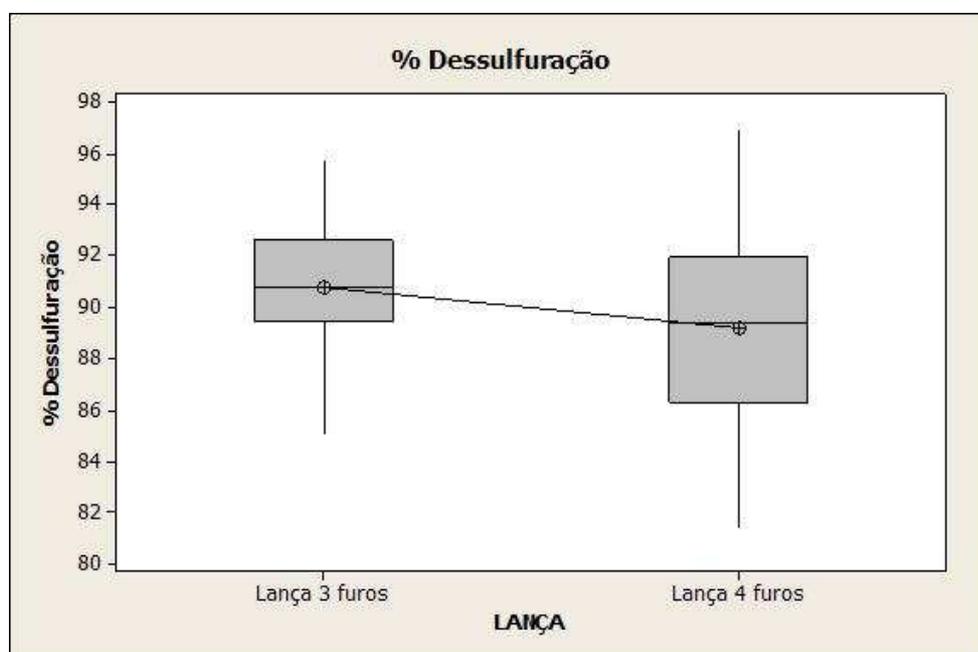


Figura 5.5 - Box-Plot da eficiência de dessulfuração no conversor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	30	90.80	2.70	0.49
Lança 4 furos	30	89.18	4.09	0.75

5.1.2 ROTA FEA-PTG

5.1.2.1 Consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$

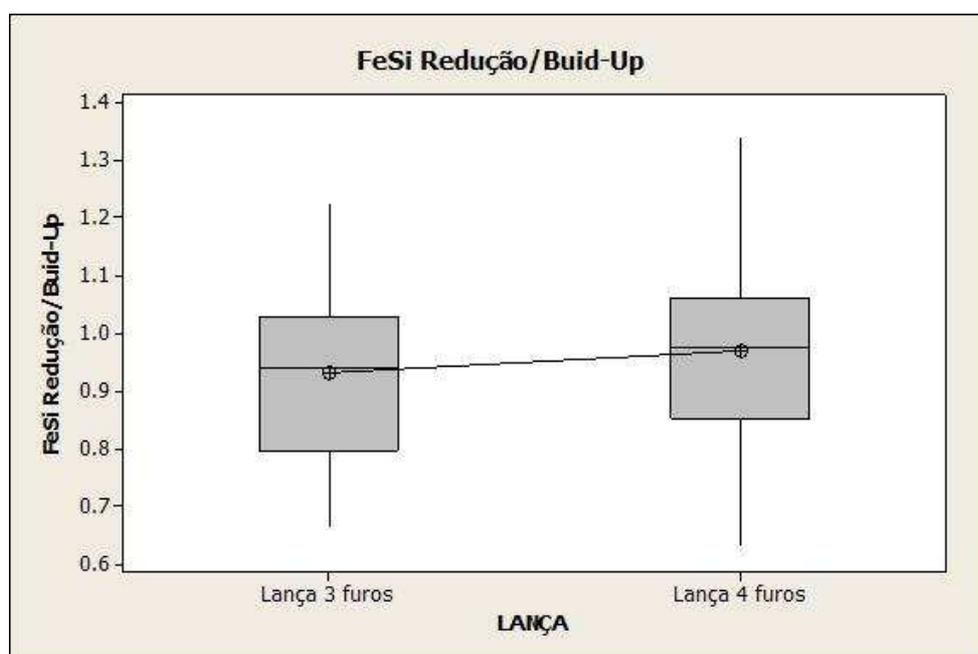


Figura 5.6 - Box-Plot da relação do consumo de $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$ utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	31	0.932	0.144	0.026
Lança 4 furos	49	0.969	0.161	0.023

5.1.2.2 Tempo de Processo - Charge-To-Tap (minutos)

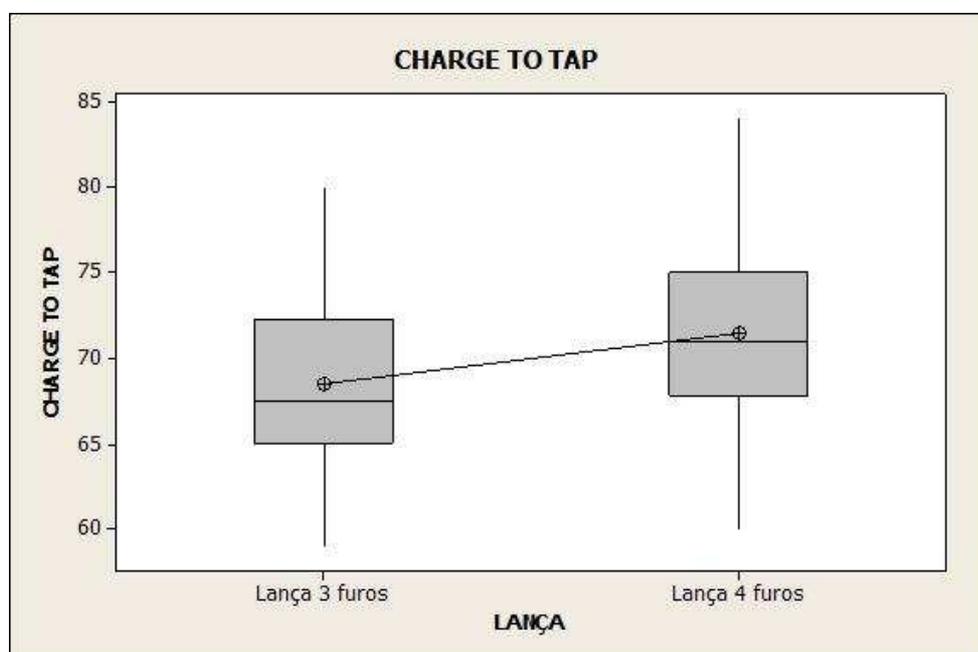


Figura 5.7 - Box-Plot do tempo de processo utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	30	68.50	5.46	1.0
Lança 4 furos	46	71.48	5.69	0.84

5.1.2.3 Consumo de Oxigênio (Nm³/t)

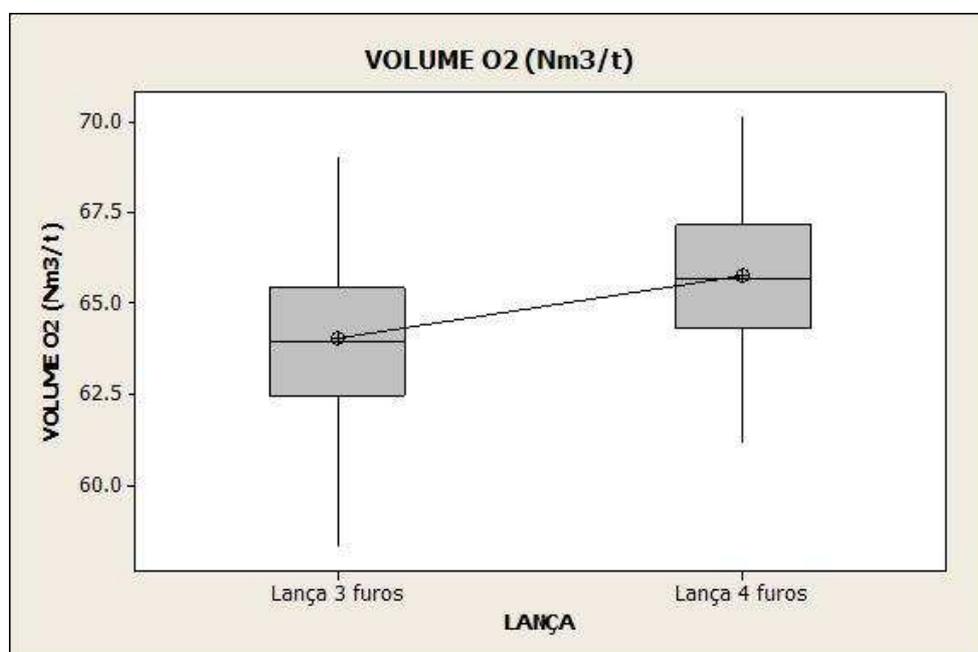


Figura 5.8 - Box-Plot do consumo de oxigênio (Nm³/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	30	64.02	2.40	0.44
Lança 4 furos	47	65.90	2.25	0.33

5.1.2.4 Consumo de Argônio (Nm³/t)

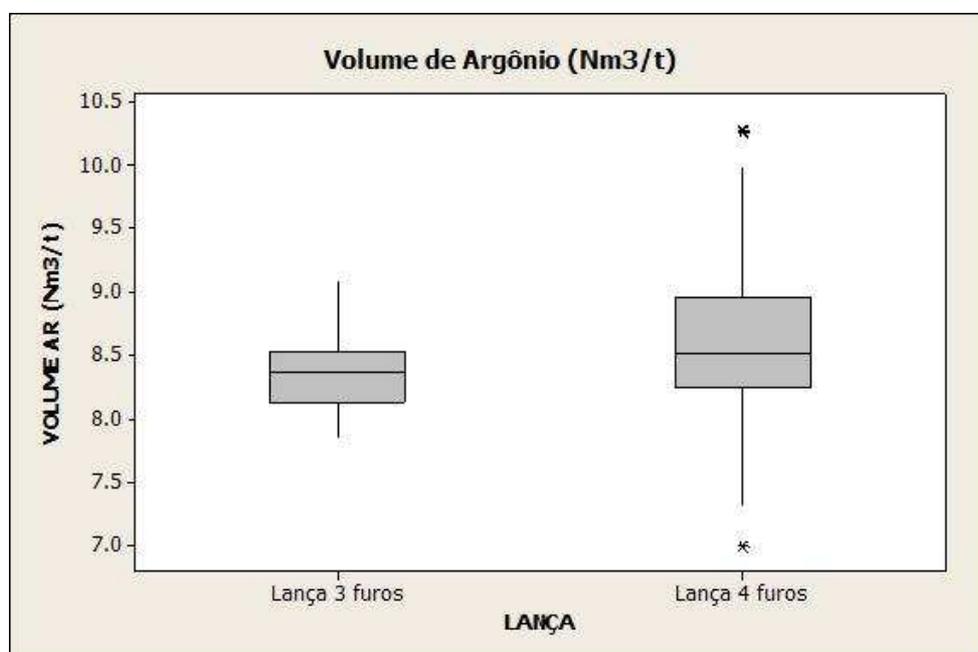


Figura 5.9 - Box-Plot do consumo de argônio (Nm³/t) utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	29	8.359	0.273	0.055
Lança 4 furos	45	8.516	0.570	0.088

5.1.2.5 Eficiência de Dessulfuração (%)

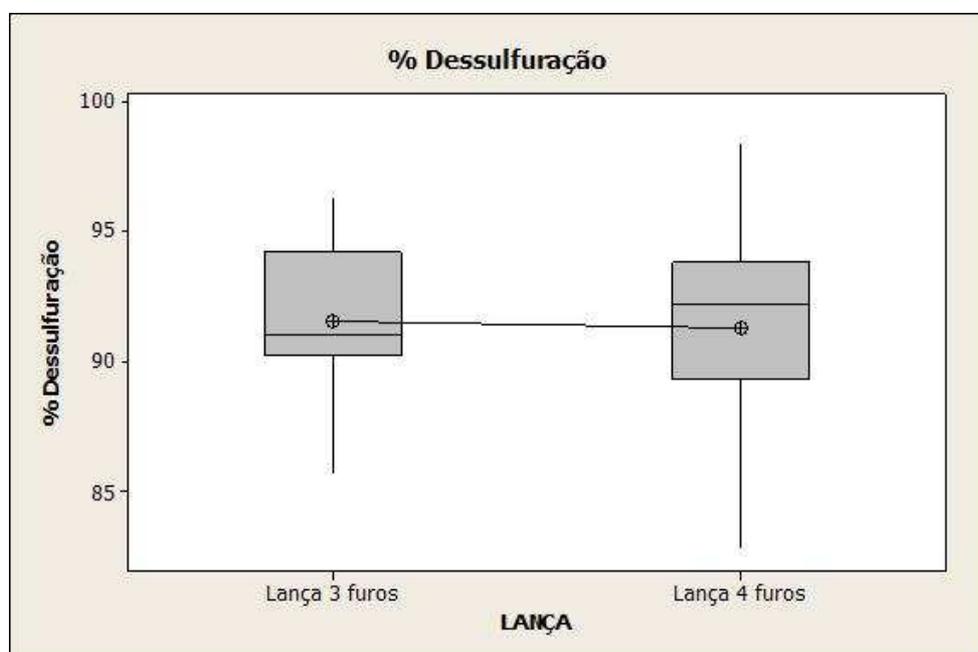


Figura 5.10 - Box-Plot da eficiência de dessulfuração no conversor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos na rota FEA-PTG.

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
Lança 3 furos	30	91.57	2.71	0.49
Lança 4 furos	45	91.29	3.97	0.59

5.1.3 Resumo dos Resultados Experimentais Utilizando Lança de 3 e 4 Furos nas Rotas FEA-FEA e FEA-PTG

Buscando traduzir em números absolutos, as diferenças encontradas nos experimentos utilizando lança de 3 e 4 furos, foi feito nesta seção uma análise comparativa das médias e dos desvios padrões das variáveis avaliadas neste trabalho, além da análise de qualidade das bobinas laminadas a frio e o desempenho refratário do convertedor AOD-L. Foram plotados gráficos comparativos com os resultados obtidos nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG.

5.1.3.1 Resultado médio

Os resultados comparativos dos experimentos utilizando lança de 3 e 4 furos para a relação $FeSi_{redução}/Buid-Up$ estão ilustrados na Figura 5.11. Para rota FEA-FEA as diferenças médias da relação $FeSi_{redução}/Buid-Up$ foram de 0,19, com resultado médio de 1,07 utilizando a lança de 3 furos e 1,26 utilizando a lança de 4 furos. Para a rota FEA-PTG as diferenças foram de 0,04 com resultado médio de 0,93 para lança de 3 furos e 0,97 para lança de 4 furos.

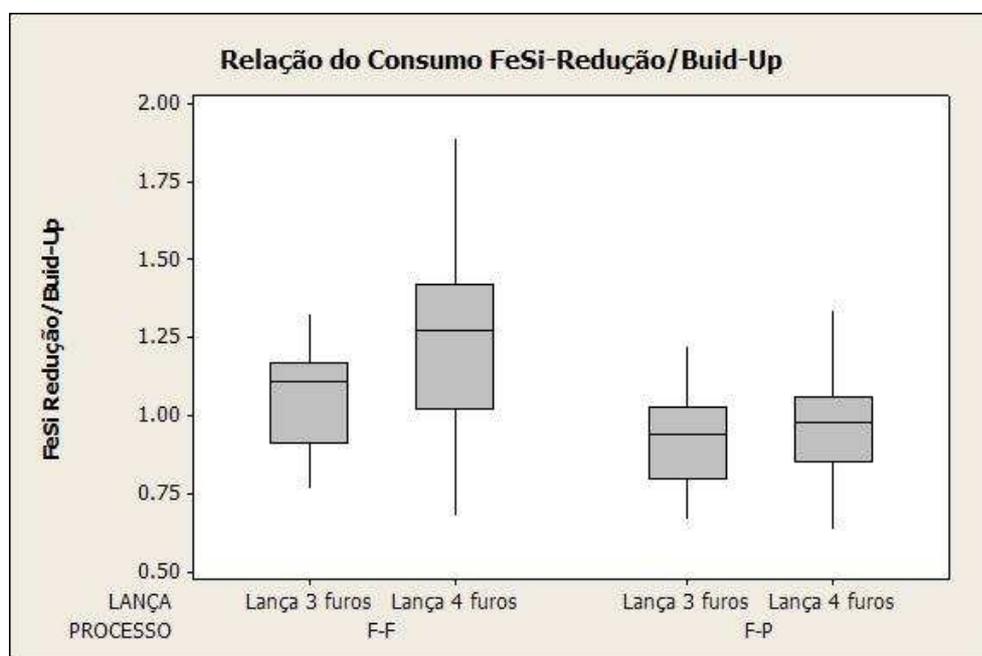


Figura 5.11- Variação da relação do consumo de $FeSi_{redução}/Buid-Up$ utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG

A variável resposta CTT (tempo de processo da corrida) ilustrado na Figura 5.12 mostra uma redução do tempo de processo quando é utilizada a lança de 3 furos em comparação com a lança de 4 furos para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG. A diferença de CTT na rota FEA-FEA foi de 1 minuto com tempo médio de 61,5 minutos utilizando a lança de 3 furos e de 62,5 minutos utilizando a lança de 4 furos. Para a rota FEA-PTG a diferença foi de 3 minutos com tempo médio de 68,5 minutos utilizando a lança de 3 furos e de 71,5 minutos utilizando a lança de 4 furos. O menor tempo de processo está associado com a melhor eficiência de descarburização na fase do processo de sopro com lança de 3 furos. Utilizando a lança de 3 furos, o carbono objetivado nesta fase, foi alcançado em um menor tempo, reduzindo o tempo total do processo.

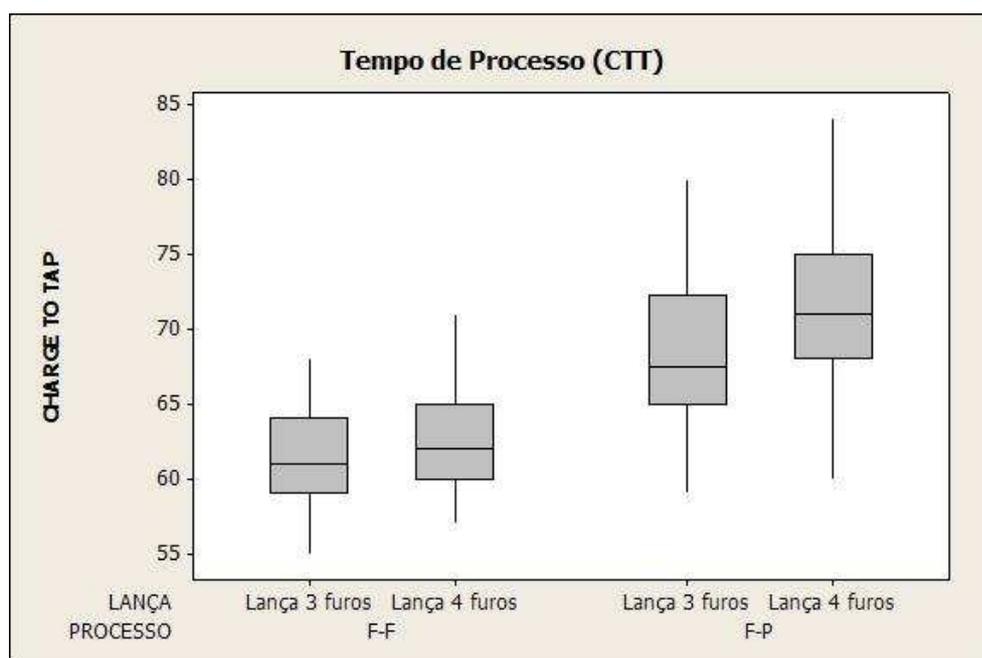


Figura 5.12 - Variação do CTT utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.

Para o consumo específico de oxigênio ilustrado na Figura 5.13, houve um maior consumo específico utilizando a lança de 4 furos. Para a rota FEA-FEA utilizando a lança de 3 furos, o consumo específico foi de $53 \text{ Nm}^3/\text{t}$ e utilizando a lança de 4 furos foi de $53,5 \text{ Nm}^3/\text{t}$. Para a rota FEA-PTG o consumo foi de $64 \text{ Nm}^3/\text{t}$ utilizando a lança de 3 furos e de $65,9$

Nm^3/t utilizando a lança de 4 furos. As diferenças no consumo de oxigênio estão de acordo com a menor oxidação dos metais, representada neste trabalho pela menor relação $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$, significando que o oxigênio foi melhor aproveitado para promover a descarbonização e em menor proporção participou da oxidação dos metais como ferro e cromo.

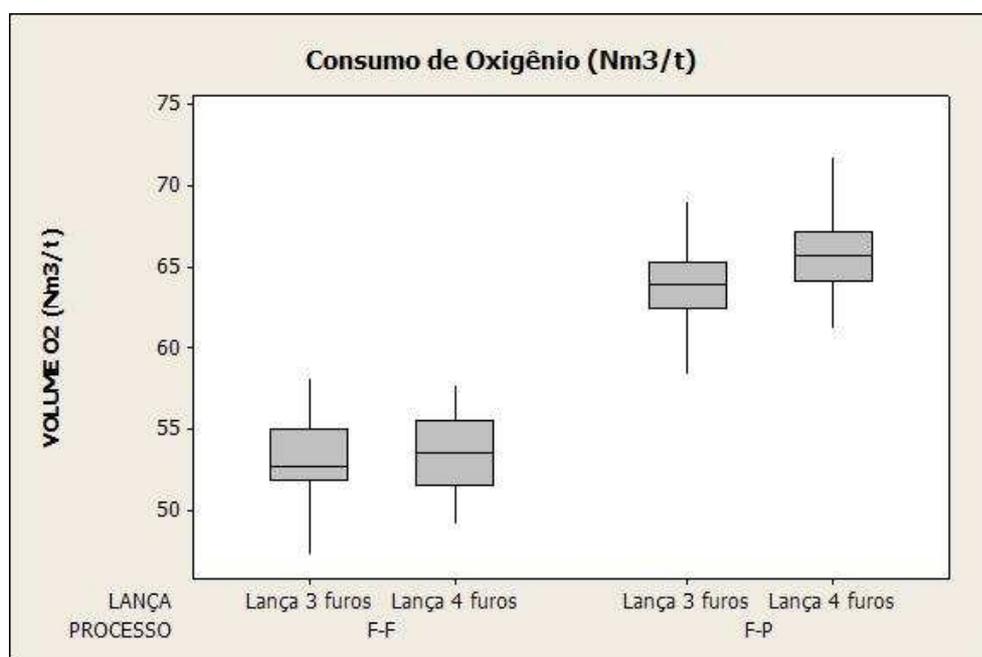


Figura 5.13 - Variação do consumo de oxigênio (Nm^3/t) utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.

A Figura 5.14 ilustra o consumo específico de argônio nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG. O consumo médio de argônio na rota FEA-FEA utilizando a lança de 3 furos e 4 furos foram 8,4 e 8,6 Nm^3/t respectivamente. Para a rota FEA-PTG utilizando a lança de 3 furos e 4 furos foi 8,4 e 8,5 Nm^3/t . As diferenças seguiram a mesma tendência das outras variáveis resposta, com melhor desempenho utilizando a lança de 3 furos, estando também de acordo com o menor tempo de processo das corridas utilizando lança de 3 furos.

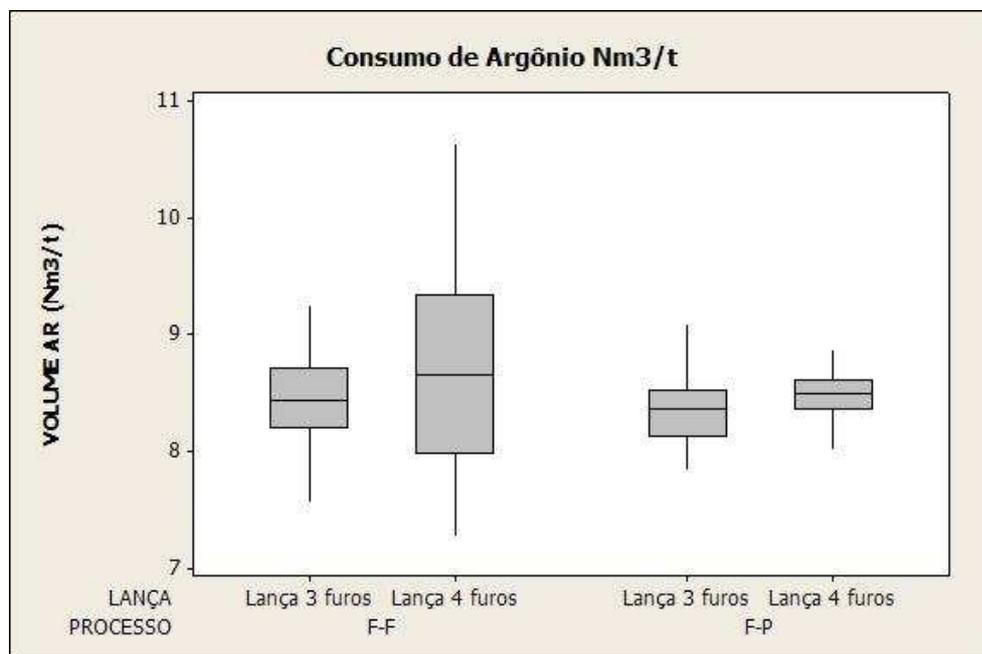


Figura 5.14 - Variação do consumo de argônio (Nm^3/t) utilizando a lança de 3 e 4 furos na rota FEA-FEA e FEA-PTG.

A eficiência média de remoção de enxofre na rota FEA-FEA utilizando a lança de 3 furos foi de 90,8% e para a lança de 4 furos foi de 89,2%. Para a rota FEA-PTG utilizando a lança de 3 furos obteve-se índice de remoção de enxofre de 91,6% e de 91,3% utilizando a lança de 4 furos. A melhor eficiência de remoção de enxofre no AOD-L esta associada à menor oxidação do banho metálico representado pela menor relação $\text{FeSi}_{\text{redução}}/\text{Buid-Up}$.

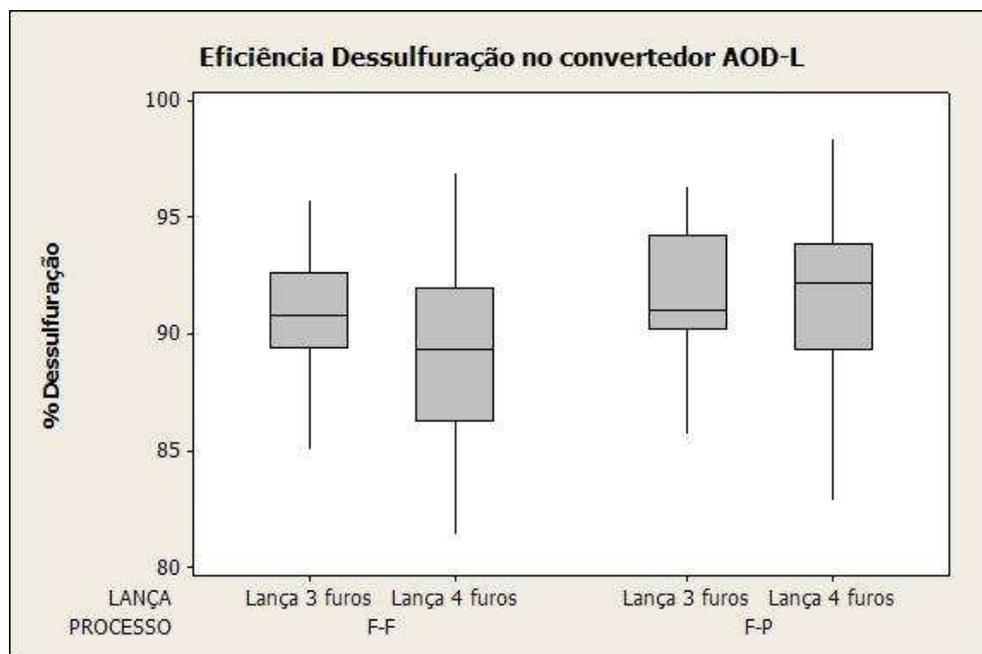


Figura 5.15 - Eficiência de dessulfuração no convertidor AOD-L utilizando lança de 3 e 4 furos para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG.

5.1.3.2 Desvio Padrão

A tabela III ilustra as diferenças do desvio padrão obtidas nos experimentos utilizando lança de 3 e 4 furos nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG. Os resultados de desvio padrão das variáveis resposta apresentaram redução utilizando a lança de 3 furos com exceção da variável resposta consumo de O_2 (Nm^3/t), que apresentaram um desvio padrão superior em 7% e 6% utilizando a lança de 3 furos nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG respectivamente.

O menor desvio padrão do processo significa uma maior repetibilidade dos resultados e maior confiabilidade no processo.

Os resultados de desvio padrão obtidos com a utilização da lança de 3 furos, alinhados com os resultados médios encontrados para as variáveis respostas definidas, demonstram que a utilização da lança de 3 furos melhor se adequou ao processo do convertidor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil.

Tabela III – Tabela comparativa do desvio padrão das corridas experimentais.

Desvio Padrão						
Variável Resposta	FEA-FEA			FEA-PTG		
	3 Furos	4 Furos	Diferença (3 F - 4 F)	3 Furos	4 Furos	Diferença (3 F - 4 F)
FeS _{redução} /Buid Up	0,16	0,30	-0,14	0,14	0,16	-0,02
CTT (minutos)	3,54	3,80	-0,26	5,46	5,69	-0,23
Consumo O ₂ (Nm ³ /t)	2,69	2,51	0,18	2,40	2,25	0,15
Consumo Ar (Nm ³ /t)	0,39	0,89	-0,50	8,36	8,52	-0,16
Efic. Dessulfuração (%)	2,70	4,09	-1,39	2,71	3,97	-1,26

5.1.3.3 Qualidade do Produto Final

Os indicadores de qualidade utilizados como critério para continuidade dos testes experimentais foram avaliados e estão ilustrados na Figura 5.18. Pelos resultados apresentados, observa-se uma redução significativa nos principais defeitos do aço P304A lasca de aquecimento e esfoliação cuja descrição segue abaixo:

- **Esfoliação:** Trata-se de inclusões que afloram à superfície da tira, com ou sem escamações, com dimensões variáveis, que podem chegar a 1 metro de comprimento na fase BQ (Bobinas laminadas a quente) e a 3 metros na fase BF (Bobinas laminadas a frio). Apresentam-se orientadas segundo a direção de laminação e têm localização aleatória na superfície da tira. São defeitos grosseiros, que podem conter acúmulo de material e dobras. Podem ocorrer em uma ou em ambas as faces da bobina e em todos os tipos de aço, porém, com maior frequência nas placas iniciais de cada corrida do lingotamento contínuo. Quando abertas, as esfoliações geralmente apresentam óxidos de cor escura em seu interior.

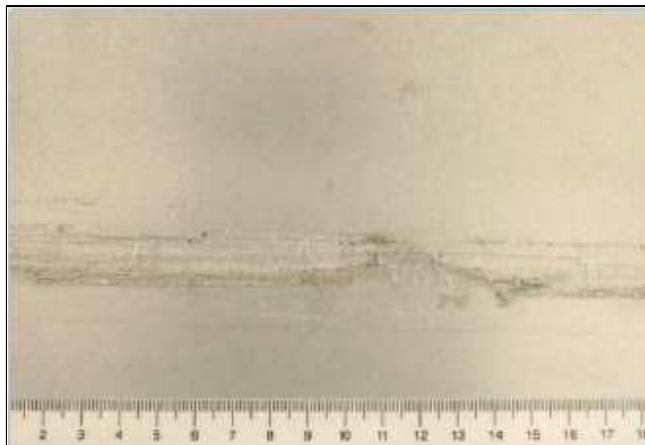


Figura 5.16 – Exemplo do defeito esfoliação (Documento Interno ArcelorMittal Inox Brasil).

- **Lasca de aquecimento:** São defeitos com a forma aproximada de um “V”, alongados na direção de laminação, que apresentam dimensões variadas, dependendo da deformação sofrida pelo material. Têm uma coloração mais escura que a da superfície da tira e ocorrem sob a forma de agrupamentos concentrados mais próximos das bordas (de 50 a 200mm). Em casos mais raros, podem se apresentar distribuídos em toda a superfície da bobina. Geralmente contém óxidos em seu interior. O defeito é de difícil visualização na bobina a quente, porém aparece após a laminação a frio. Podem afetar uma ou ambas as faces da bobina e são típicos dos aços austeníticos.



Figura 5.17 – Exemplo do defeito Lasca de Aquecimento (Documento interno ArcelorMittal Inox Brasil).

Para avaliação dos resultados de qualidade foram comparados os índices abaixo, utilizando lança de 3 e 4 furos:

- Índice de desvio: significa o não atendimento dos parâmetros mínimos de qualidade do produto final, implicando no desvio do produto para reprocessamento ou sucataamento.
- Índice de ocorrência: significa que houve uma pequena ocorrência de algum defeito, porém sem comprometer a aplicação do produto.

Para o defeito lasca de aquecimento houve redução de 7,09 pontos percentuais na ocorrência do defeito e 1,2 nos índices de desvio.

Para o defeito esfoliação foi observado redução de 1,4 para o índice de ocorrência e 0,6% nos índices de desvio.

Os resultados de esfoliação gerado pela presença de inclusões no aço estão diretamente relacionados à oxidação do banho que no caso da experiência utilizando a lança de 3 furos, apresentou resultado médio menor. A redução no defeito lasca de aquecimento utilizando lança de 3 furos, está associada à melhor dessulfuração do aço, uma vez que teores mais elevados de enxofre no aço favorecem a formação de sulfetos de níquel (Sartori, 2008), que têm relação direta com o defeito lasca de aquecimento.

A redução do defeito no produto final diminui a quantidade de material sucataado, com redução das perdas devido ao reprocessamento de material. Outro ganho decorrente da melhoria do índice de qualidade está associado ao atendimento do cliente no prazo programado.

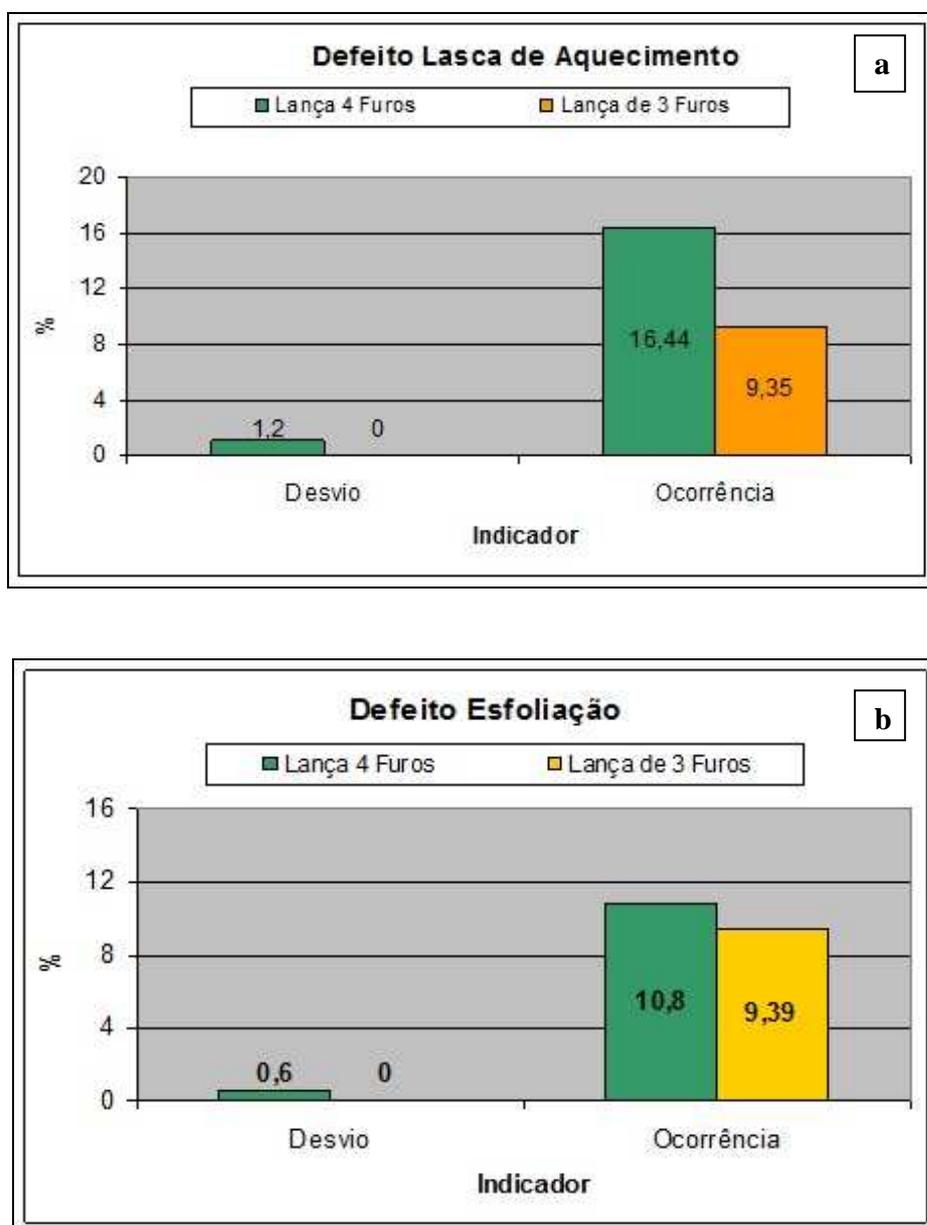


Figura 5.18 - Evolução do desvio e ocorrência do defeito lasca de aquecimento (a) e esfoliação (b) utilizando lança de 3 e 4 furos.

5.1.3.4 Desempenho Refratário

Outro parâmetro muito importante a ser avaliado após qualquer modificação no bocal da lança em convertedor AOD-L, é o desgaste refratário na região das ventaneiras instaladas na lateral do convertedor. O desgaste refratário na região das ventaneiras é que

normalmente define o fim da vida em convertedores AOD-L e devem, portanto ser monitorados continuamente, buscando maximizar sua vida. Na ArcelorMittal Inox Brasil, a vida média do convertedor é de aproximadamente 140 corridas e a mensuração do desgaste das ventaneiras ocorre em média a cada 10 corridas, sendo mais intenso no final da campanha do convertedor.

Como os experimentos realizados neste trabalho foram feitos de maneira gradativa e aleatória no aço P304A, não foi possível a realização de uma campanha refratária completa utilizando a lança de 3 furos, não sendo portanto possível avaliar o seu efeito total no desgaste refratário. Foi feito então, uma comparação do desgaste individual das ventaneiras em 25 campanhas do ano de 2010 antes do início do teste com lança de 3 furos, com 7 campanhas após o início dos experimentos, em que foram produzidas 80 corridas utilizando a lança de 3 furos.

As Figura 5.19 e Figura 5.20 ilustram os resultados de desgaste percentual, no final da campanha, das 5 ventaneiras instaladas na lateral do convertedor, antes e após o início do teste com lança de 3 furos.

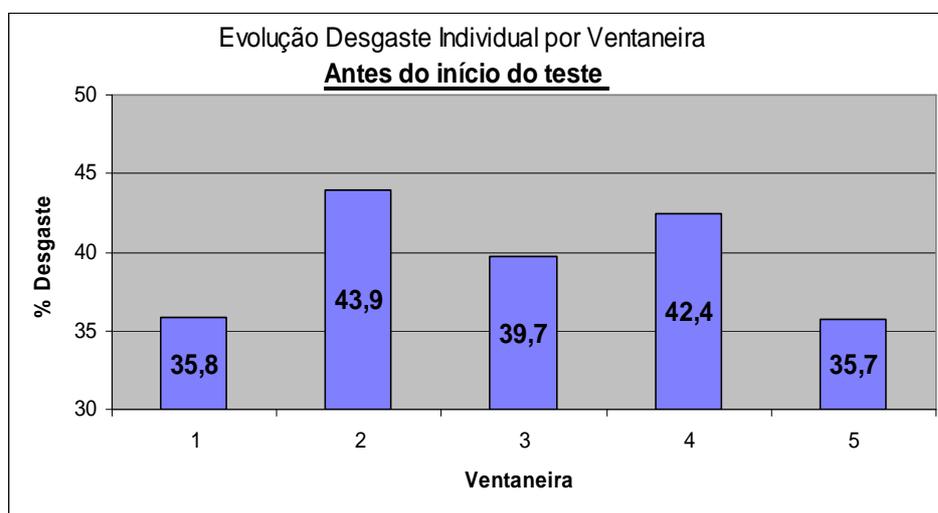


Figura 5.19 – Percentual de desgaste individual das ventaneira no final da campanha refratária antes do início do teste com lança de 3 furos.

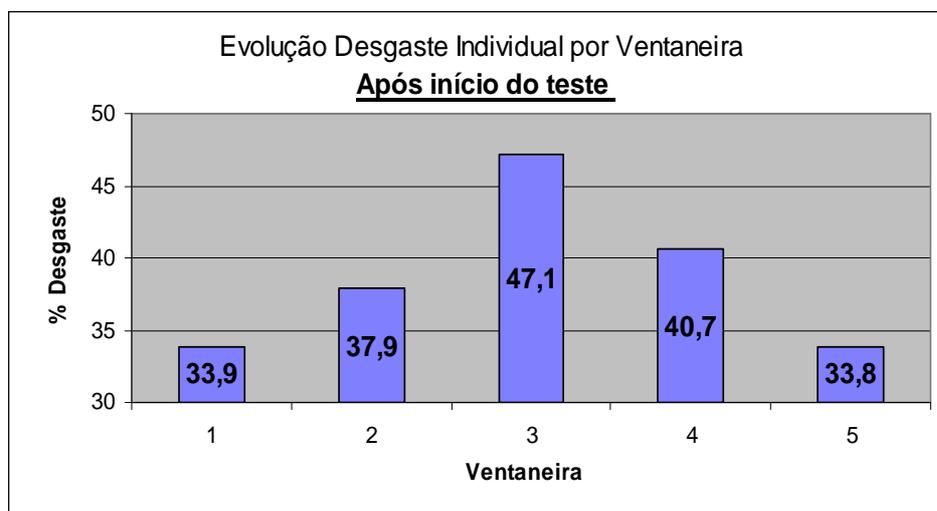


Figura 5.20 - Percentual de desgaste individual das ventaneira no fim da campanha refratária após início do teste com lança de 3 furos.

Pelos resultados apresentados, observa-se um desgaste mais acentuado das ventaneiras 2 e 4 no final da campanha refratária, antes do início do teste utilizando a lança de 3 furos para sopro de oxigênio no convertedor. Após experiência em 80 corridas utilizando lança de 3 furos, observa-se um desgaste percentual mais acentuado da ventaneira 3 em comparação com as demais ventaneiras. O desgaste mais acentuado das ventaneiras 2 e 4 pode ser caracterizado pelo jato de oxigênio mais intenso dos bocais da lança de 4 furos em direção às ventaneiras 2 e 4. Utilizando lança de 3 furos, pode ter ocorrido uma maior concentração do jato sobre a ventaneira 3, em função da posição do bico da lança nos experimentos, provocando uma maior intensidade de desgaste desta ventaneira. Estes resultados devem ser confirmados através da realização de um maior número de experimentos, em uma campanha completa utilizando lança de 3 furos.

Outro ponto importante a ser considerado, é o número médio de corridas por campanha antes e após o início das experiências utilizando lança de 3 furos. A Figura 5.21 ilustra a vida média do convertedor em 25 campanhas antes do início do teste com a lança de 3 furos e em 7 campanhas após o início do teste utilizando lança de 3 furos. Houve uma evolução significativa na vida média do convertedor após o início dos testes experimentais utilizando a lança de 3 furos. Mesmo sabendo que os resultados de menor tempo de corrida e menor oxidação de cromo obtidos com a utilização da lança de 3 furos favorecem o desgaste

refratário, a evolução da vida média por campanha deve ser confirmada realizando um maior número de corridas experimentais utilizando lança de 3 furos.

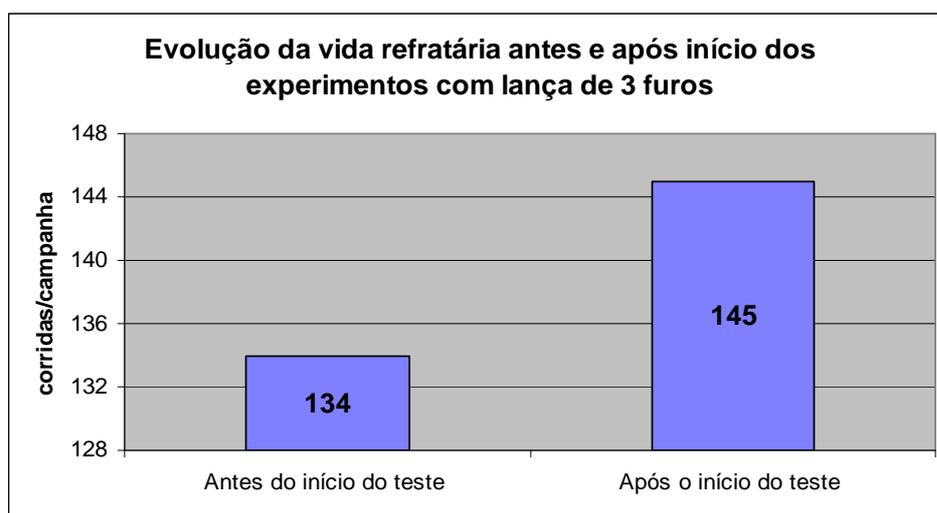


Figura 5.21 – Evolução da vida refratária antes e após o início das experiências utilizando lança de 3 furos.

Os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho reforçam que todo processo, por mais semelhante que sejam, apresentam sua particularidade operacional e de processo que devem ser consideradas durante desenvolvimentos tecnológicos. No caso específico, desenvolvimentos realizados por Chaves (2006) em convertedor LD na produção de aço carbono, apresentaram resultados diferentes dos encontrados neste trabalho. Os estudos realizados por Chaves (2006) demonstraram que para o processo da ArcelorMittal João Molevade a utilização de lança de 4 furos foi mais favorável.

Apesar de utilizarem o princípio de descarburização semelhantes, o convertedor AOD-L e LD apresentam suas particularidades. O convertedor AOD-L em geral é utilizado para produção de aço inoxidável e convertedores LD para aços carbono. O convertedor AOD-L apresenta ventaneiras laterais para sopro de oxigênio e gás inerte com altas pressões, implicando em um fluxo de gás bastante diferenciado em comparação com o processo LD, fato suficiente para justificar os resultados encontrados por Chaves (2006) e os resultados encontrados neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

As conclusões serão divididas de acordo com as variáveis respostas selecionadas neste trabalho, assim distribuídas:

FeSi_{redução}/Buid-Up

A variável resposta FeSi_{redução}/Buid-Up apresentou redução para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG utilizando lança de 3 furos em comparação com o processo utilizando lança de 4 furos. Uma menor relação de FeSi_{redução}/Buid-Up significa que houve uma menor oxidação do banho metálico utilizando lança de 3 furos. A menor oxidação do banho favorece a descarburagem decorrente da menor geração de escória durante o processo, além dos ganhos financeiros decorrentes do menor consumo de redutores, fundentes e refratário. A redução média na relação FeSi_{redução}/Buid-Up foram de 0,19 e 0,04 para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG respectivamente.

CTT (Tempo de Processo)

Nas corridas experimentais houve redução do tempo total de processo nas rotas de produção FEA-FEA e FEA-PTG utilizando lança de 3 furos. O menor tempo de processo está de acordo com a melhor descarburagem favorecida na fase de sopro pela utilização da lança de 3 furos. Na fase de sopro com ventaneira, a descarburagem foi favorecida devido a menor geração de escória decorrente da menor oxidação do banho. Os ganhos médios de tempo de processo foram de 1 minuto nas corridas processadas na rota FEA-FEA e 3 minutos na rota FEA-PTG contribuindo para o aumento da produtividade do processo.

Consumo específico de oxigênio (Nm³/t)

O consumo específico de oxigênio também apresentou redução nas rotas de produção FEA-FEA e FEA-PTG utilizando lança de 3 furos. Os resultados obtidos estão de acordo com a menor oxidação do banho metálico, implicando em um menor consumo de oxigênio na oxidação dos metais. A redução do consumo específico de oxigênio (Nm³/t) foi de 0,5 e 1,9 para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG respectivamente.

Consumo específico de argônio (Nm^3/t)

As diferenças de consumo específico de argônio (Nm^3/t) foram menos significativas, porém seguiram a mesma tendência das outras variáveis respostas com melhor desempenho utilizando a lança de 3 furos. As reduções de consumo específico de argônio (Nm^3/t) foram de 0,2 e 0,1 para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG respectivamente e estão relacionadas com o menor tempo de processo das corridas experimentais utilizando lança de 3 furos.

Eficiência de dessulfuração no AOD-L

A eficiência de dessulfuração no convertedor AOD-L apresentou melhor resultado no processo utilizando lança de 3 furos comparado com o processo utilizando lança de 4 furos nas rotas FEA-FEA e FEA-PTG. A melhor eficiência de dessulfuração está de acordo com a menor oxidação do banho utilizando lança de 3 furos, favorecendo a remoção de enxofre do aço. As diferenças de eficiência de dessulfuração utilizando lança de 3 furos e 4 furos foram de 2% e 1% para as rotas FEA-FEA e FEA-PTG respectivamente.

Qualidade do produto Final

A melhor qualidade das bobinas laminadas a frio estão em concordância com os resultados apurados, relacionados à menor oxidação do metal no processo de elaboração utilizando lança de 3 furos. A redução do desvio global do defeito lasca de aquecimento nas corridas processadas utilizando lança de 3 furos foi de 1,2%. Para o defeito esfoliação a redução foi de 0,6%.

Desempenho refratário

O desgaste individual das ventaneiras se mostrou mais acentuado nas ventaneiras 2 e 4 utilizando lança de 4 furos e tendencioso a ser mais acentuado na ventaneira 3 nas campanhas em que foram realizadas 80 corridas experimentais utilizando lança de 3 furos. O desgaste diferenciado pode ter relação com o fluxo de oxigênio da lança de topo, que pode ser tendencioso, sobre as ventaneiras 2 e 4 utilizando lança de 4 furos, e sobre ventaneira 3 utilizando lança de 3 furos.

A vida média do convertedor apresentou evolução positiva após experiência de 80 corridas distribuídas em 7 campanhas refratárias. Mesmo sabendo que os resultados de menor tempo de corrida e menor oxidação de cromo obtidos com a utilização da lança de 3 furos favorecem o desgaste refratário, a evolução da vida média por campanha deve ser confirmada realizando um maior número de corridas experimentais utilizando lança de 3 furos.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Fazer teste com lança de 3 furos na posição oposta à realizada neste trabalho, com 1 furo em lado oposto ao das ventaneiras conforme ilustrado na Figura 7.1.

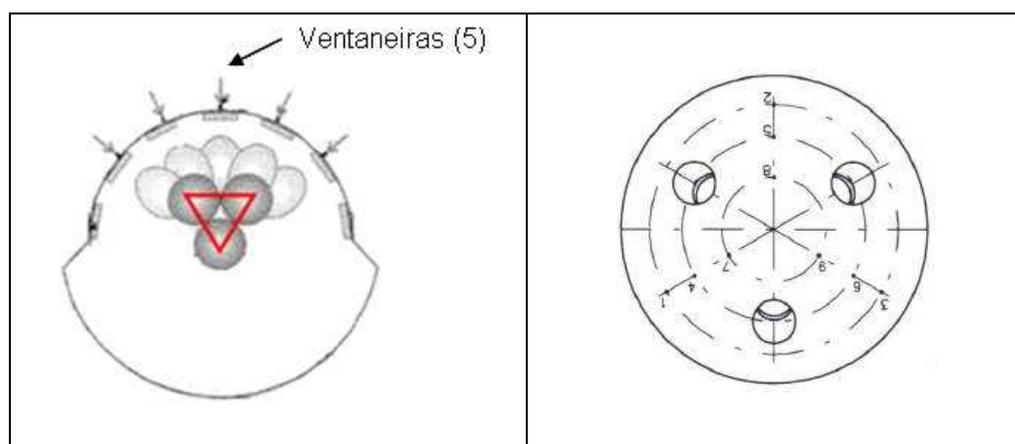


Figura 7.1 – Posição de sopro de oxigênio com lança de 3 furos.

- Testar a lança de 3 furos nos aços da série 4xx.
- Testar a lança de 3 furos em uma campanha refratária completa.
- Testar lança com ângulo de abertura de 8° , objetivando um sopro mais central, e sua avaliação no desgaste individual das ventaneiras.
- Trabalhar altura da lança correlacionando oxidação de cromo e desgaste na sola do convertedor.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, A.R.; JOHNS, F.R. Characteristics of Free Supersonic Jets Exhausting into Quiescent Air, *Jet Propulsion*; 25, n.1, p.13-25, 1995.

BJURSTRÖM, M.; TILLIANDER, A.; IGUCHI, M.; JÖNSSON, P. Physical-modeling Study of Fluid Flow and Gas Penetration in a Side-blown AOD Converter. *ISIJ Int.*, v.46, n. 4, p.523-529, 2006.

CHARLES, J. Past, Present and Future of the Duplex Stainless Steel, *ArcelorMittal Stainless/Ugine&ALZ, First International Duplex Conferences*, 2000.

CHAVES, A.J.M. Avaliação do Desempenho Operacional de um Convertedor LD com Lança de 4 Furos. Belo Horizonte: UFMG, 2006, 123 pg. (M.Sc., Metalurgia Extrativa).

CHOULET, R.J.; CHAN, A.H.; PATIL, B.V. Refining of Stainless Steel. In: FRUEHAN, R.J.. *Making, Shaping and Treating of Steel*. 11ª Edição. Pittsburg, Estados Unidos: The AISE Foundation, 1998, Capítulo 12, p.715.

CHOULET, R.J.; CHAN, A.H.; PATIL, B.V. Refining of Stainless Steel. In: RUEHAN, R.J.. *Making, Shaping and Treating of Steel*. 11ª Edição. Pittsburg, Estados Unidos: The AISE Foundation, 1998, Capítulo 4, p.248.

CHOULET, R.J.; *Stainless Steel Refining*. AISE Seminar. Detroit, 1997.

FABRITIUS, T.; KUPARI, P.; HARKKI, J. Physical Modelling of Sidewall-Blowing Converter. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. N. 30, p. 57-64, 2001.

FABRITIUS, T.; MURE, P.T.; HARKKI, J.J. The Determination of the Minimum and Operational Gas Flow Rates for Sidewall Blowing in the AOD-Converter. *ISIJ Int.*, v.43, n.8, p.1177-1184, 2003.

FLINN, R.A. – Jet Penetration and Bath Circulation in the Basic Oxigen Furnace – *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* – November 1967; volume 239, p. 1776-1790.

GLASS, D.R. and Smith, G.C. – *Nozzle Theory – BOF Steelmaking – Vol. I* – New York; 1974.

HALLSTEN, S. Bench-scale Study of Calcined Metal Hydroxide Sludge as Flux in AOD Converter Process; Lulea: Lulea University of Technology, 2007, 95 pg. (MSc Programmes in Engineering).

KUMAGAI, T.; IGUCHI, M. Instability Phenomena at Bath Surface Induced by Top Lance Gas Injection. *ISIJ Int.*, v.41S, p.52-55, 2001.

Li, D.; Chi, H.; Shao, S. The Analysis of the Blowing Process with the Top Lance of the Argon Oxygen Decarburization (AOD) in Baosteel. *Materials Science Forum*. Vols. 561-565. P.1039-1042, 2007.

MARIN, H. Modelamento Matemático do Refino do Aço Inoxidável em convertedores AOD-L; Belo Horizonte: UFMG, 2006, 130 pg. (M.Sc., Metalurgia Extrativa).

MARTINS, A.A. Lança de Oxigênio e Características do jato. *Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio*. ABM, p.465-484, 2008.

NAITO, K.; OGAWA, Y.; INOMOTO, T.; KITAMURA, S.; YANO, M. Characteristics of Jets from Top-Blown Lance in Converter. *ISIJ Int.*, v.40, n.1, p.23-30, 2000.

SARTORI, D,F,F. Avaliação do Efeito do Volume e da Vazão de Gás na Recuperação de Metais Oxidados no Processo de Produção de Aço Inoxidável em Converteador AOD; Belo Horizonte: UFMG, 2009, 112 pg. (M.Sc., Metalurgia Extrativa).

SARTORI, D,F,F. Curso de Formação de Aciaristas – Modulo AOD. ArcelorMittal Inox Brasil, Curso interno direcionado para os funcionarios da ArcelorMittal Inox Brasil. p.1-72, 2008.

SHELLER, P.R.; WAHLERS, K.T.N. Reaction Areas during OombinedBlowing in the AOD-converter. *ISIJ Int.*, v.36, p.S69-S72, 1996.

SUZUKI, K; BAN-YA, S; HINO,M. Deoxidation Equilibrium of Cr-Ni Stainless Steel with Si at Temperatures from 1823 to 1923K. *Ironmaking and SteelMaking*. v.42, n.2, p.146-149, 2002.

TAGO, Y., HIGUCHI,Y. Fuid Flow Analysis of Jets from Nozzles in Top Blown Process. *ISIJ Int.*, v.43, n.2, p.209-215, 2003.

VERCRUYSSSEN, C.; WOLLANTS P.; ROOS, J. R.; ROBERTSON, D. G. C.; BERTELS, L. Mathematical Modeling of Refining of Stainless Steel in MPRA Converter. *Ironmaking and Steelmaking*, v.21, n.4, p.287-296, 1994.

WANG, W.; YUAN, Z.; MATSUURA, H.; ZHAO, H., DAI, C.; TSUKIHASHI, F. Three-dimensional Compressible Flow Simulation of Top-blown Multiple Jets in Converter. *ISIJ Int.*, v.50, n.4, p.491-500, 2010.

WEI, J.; ZHU, H.; CHI, H.; WANG, H. Physical Modeling Study on Combined Side and Top Blowing AOD Refining Process of Stainless Steel: Fluid Mixing Characteristics in Bath. *ISIJ Int.*, v.50, n.1, p.26-34, 2010.

ANEXOS

Anexo 1 - Exemplo do programa de sopro do convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil.

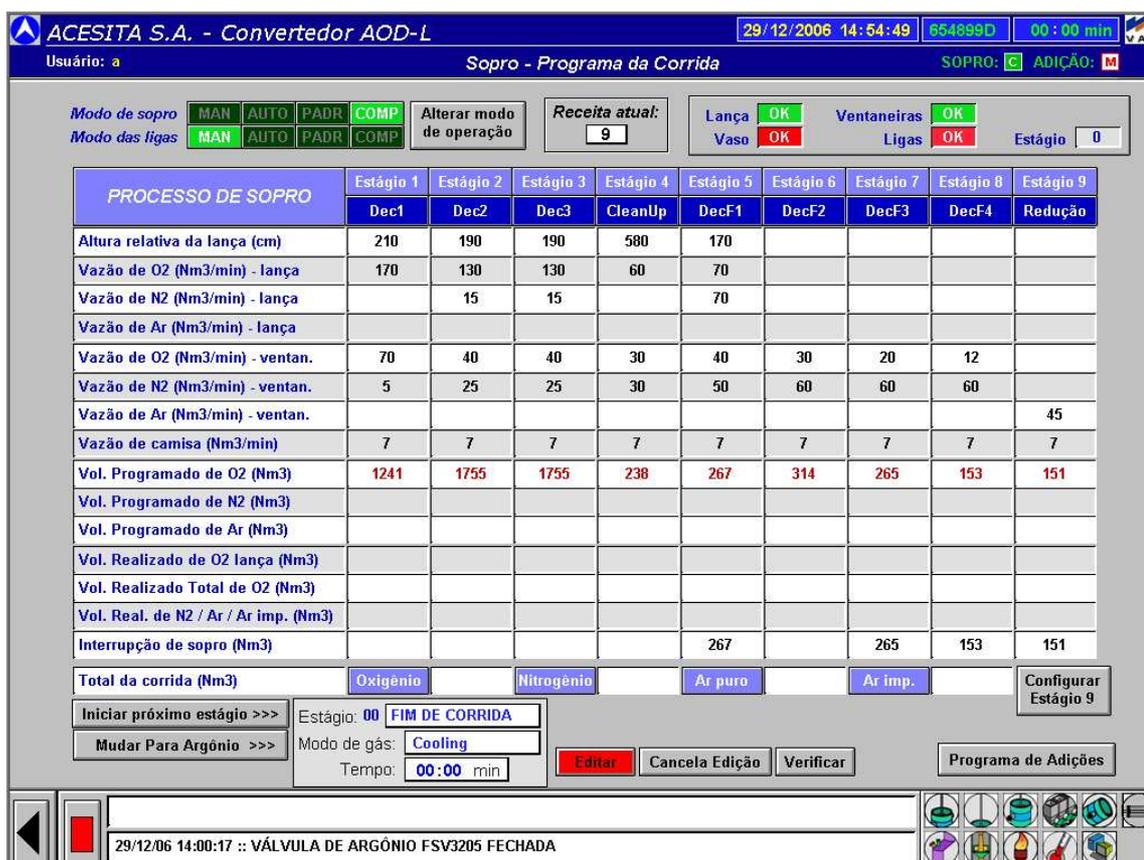


Figura 8.1 - Programa de sopro e fases do processo de uma corrida realizada no AOD-L

Descrição das fases do processo no convertedor AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil

- Homogeneização inicial: Consiste no sopro de gás inerte pelas ventaneiras, tendo como finalidade, garantir a homogeneização térmica e química do metal líquido carregado no AODL.
- Dec 1: Nesta fase tem-se como principal objetivo, aumentar a temperatura do banho através da injeção de gases, oxigênio e gás inerte, via lança e ventaneiras, o que resulta em ganho térmico com a oxidação do silício e do carbono existente no pré-metal. Na Dec 1 é adicionado somente fundentes (cal e cal dolomítica) para

proteção do revestimento refratário, sendo a quantidade dos mesmos determinada pelo modelo matemático.

- Dec 2 e Dec 3: A prioridade básica nesta fase, é a intensificação da retirada do carbono. Também é utilizado o sopro de oxigênio e gás inerte, com lança e ventaneiras. As adições de ligas que contém carbono tais como ferro cromo e ferro manganês são adicionadas prioritariamente nestas fases.
- Clean-up: Esta fase é realizada somente quando existe a impregnação de metal no cone superior, normalmente, inicia-se a partir da 70ª corrida da campanha refratária. São utilizados injeções de gases na lança e ventaneiras, sendo que a lança é posicionada em uma altura próxima a região da impregnação de metal.
- Dec Final: Esta é a última fase da descarburização e é subdividida em sub-fases, onde várias combinações de gases são utilizadas, de forma a minimizar a oxidação dos metais (Cromo, Manganês, etc). Nesta fase não é utilizada a lança e as adições quando necessárias, deverão ocorrer objetivando utilização de materiais de baixo teor de carbono.
- Redução: Esta fase tem como objetivo, recuperar os metais oxidados durante a descarburização, com a adição da mistura redutora e homogeneização com argônio além de promover a desnitração e dessulfuração. A mistura redutora é composta de FeSi, Fluorita e Cal , calculada pelo modelo matemático.
- Ressoro: Fase utilizada para aquecimento do metal líquido. Nesta fase é realizada a injeção de gases (oxigênio e gás inerte) nas ventaneiras, e a adições de ferro silício e cal. Esta fase pode ser utilizada, se necessário, antes da fase de redução (preferencialmente) e/ou após a redução.
- Resfriamento: Fase utilizada para resfriamento do metal líquido. Nesta fase é realizada a injeção de gás inerte nas ventaneiras. A perda térmica desta fase é cerca de 4°C/min.

Anexo 2 - Balanço Térmico do Convertedor AOD-L

O balanço térmico é feito para se calcular a temperatura do banho líquido levando em consideração as entalpias das reações químicas, a dissolução dos elementos nas ligas adicionadas, as perdas térmicas do sistema dentre outras variáveis.

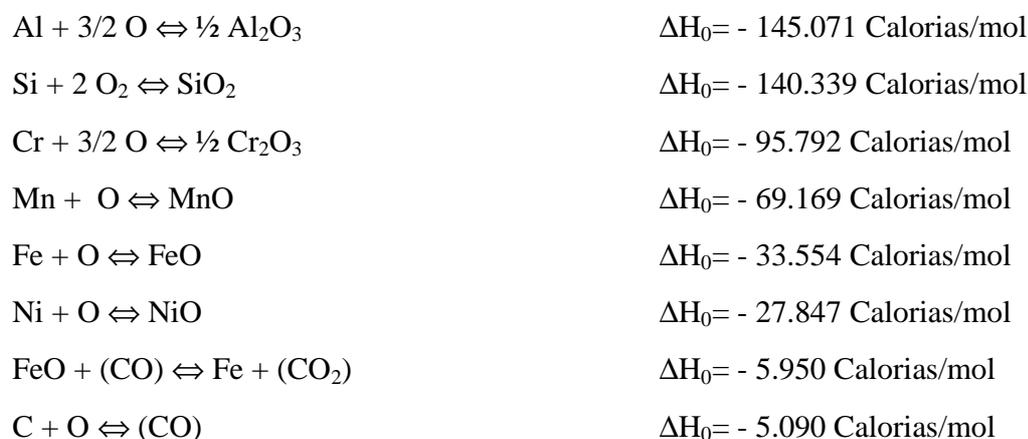
No processo do AOD o modelo matemático TopAOD (Anexo 5) calcula a temperatura do metal no final de cada fase e, já o modelo da Carbometria calcula, de acordo com os acontecimentos reais da corrida, o valor “on line” da temperatura. Como estes modelos são complexos e envolvem um grande número de cálculos, abordaremos apenas algumas considerações importantes para o entendimento do aumento ou da queda de temperatura no metal líquido.

As reações envolvidas podem ser:

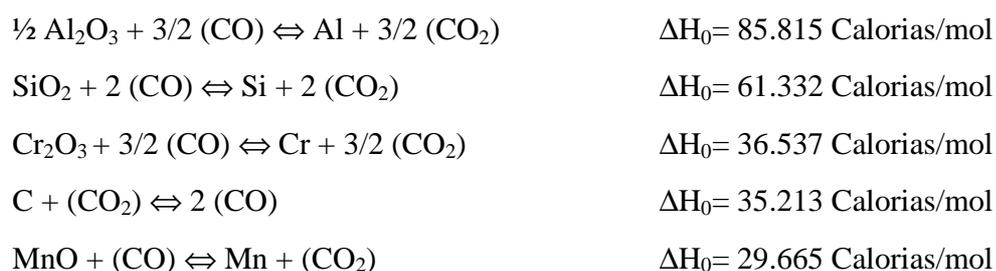
Reações endotérmicas: Ocorrem com absorção de calor, ou seja, reduzem a temperatura do banho;

Reações exotérmicas: Ocorrem com geração de calor, ou seja, aumentam a temperatura do banho.

Algumas reações que acontecem no processo de elaboração do aço inoxidável são descritas a seguir, sendo as reações exotérmicas em ordem decrescente de geração de calor.



As reações de descarburização indireta são endotérmicas. A seguir seguem algumas das reações endotérmicas envolvidas no processo, em ordem decrescente em relação a absorção de energia:



Considerando a entalpia das reações e um CRE médio em cada fase, calcularam-se as perdas térmicas médias de cada fase do processo AOD (Tabela IV) e as perdas para diferentes vazões de oxigênio (Tabela V).

Tabela IV - Perda térmica média para cada fase do processo

Fases	Perda Térmica (°C/min)
Dec1	37
Dec2	31
Dec3	28
Clean-up	10
DecF1	8
DecF2	5
DecF3	4
DecF4	2

Tabela V - Perda térmica média para as vazões utilizadas nas fases finais do processo

Vazões de Oxigênio	Perda Térmica (°C/min)
40	8 a 10
30	5 a 7
20	3 a 5
18	2 a 4
15	1 a 2
12	0,4 a 0,8

Considerando a dissolução das ligas, calculou-se a perda térmica para a adição de 1 tonelada de diferentes tipos de ligas, descrito na Tabela VI.

Tabela VI - Perda térmica para cada tipo de liga adicionada

Código	Descrição	Perda Termica (°C/min)
L010	Cal	- 26°C
L081	Cal dolomítica	- 28°C
L054	Ferro cromo	0°C
FeNi	Ferro níquel	- 22°C
L052	Níquel eletrolítico	- 20°C
L046	Ferro manganês	- 25°C
L004	Cobre	- 27°C
L006	Ferro Sílico manganês	- 15 °C
L085	Ferro Nióbio	- 21 °C
S023	Sucata	- 20°C
L059	Ferro Silício	+30°C

Anexo 3 - Calculo da quantidade de ferro silício adicionado na fase de redução

A quantidade de ferro silício a ser adicionada para promover as reações de desoxidação, redução dos óxidos e incorporação de silício ao aço é determinada em função das quantidades de carbono e cromo contidos na última amostra de aço, obtida durante a fase de descarbonização, e dos objetivos finais de teores de silício e cromo do aço. A equação geral utilizada para o cálculo da massa de liga ferro silício é expressa como:

$$P_{FeSi} = \left(\frac{P_{aço} \cdot (\%Cr_{obj} - \%Cr_{final})}{\left(\%Si_{FeSi} \cdot \frac{Rend}{100} \right)} \cdot \frac{PM_{Si}}{1,33 \cdot PM_{Cr}} \right) + \frac{P_{aço} \cdot (\%Si_{obj})}{\left(\%Si_{FeSi} \cdot \frac{Rend}{100} \right)}$$

Onde:

P_{FeSi} = Massa de ferro silício a ser adicionado (kg);

$P_{aço}$ = Massa de aço a ser produzido (kg);

$\%Cr_{obj}$ = Teor de cromo objetivado no aço (%);

$\%Si_{obj}$ = Teor de silício objetivado no aço (%);

$\%Cr_{final}$ = Teor de cromo contido no aço, antes da redução (%);

$\%Si_{FeSi}$ = Teor de silício contido na liga de ferro silício (%);

$Rend$ = Rendimento do ferro silício (%);

PM_{Si} = Peso molecular do silício (g);

PM_{Cr} = Peso molecular do cromo (g).

O valor da massa de aço a ser produzido ($P_{aço}$) é calculado através de um balanço de massa, realizado pelo modelo matemático de cálculo, denominado TopAOD. Os valores de teores de cromo e silício objetivados são definidos em função da especificação química do aço e o teor de cromo contido no aço, antes da redução ($\%Cr_{final}$). Este teor é calculado com base no teor de cromo contido na amostra de aço, retirada durante o processo de

descarburação, e do volume de oxigênio injetado após a realização da amostragem. O teor de cromo final é dado por:

$$\%Cr_{final} = (\%Cr_{amostra} - \%Cr_{oxidado})$$

Onde:

$\%Cr_{amostra}$ = Teor de cromo contido na última amostra de aço retirada durante o processo de descarburação (%);

$\%Cr_{previsto}$ = Teor de cromo oxidado após a retirada da amostra de aço (%).

O teor de cromo oxidado após a retirada da amostra de aço (%Cr previsto) é calculado em função do volume de oxigênio soprado após a realização da amostragem e de uma constante de eficiência de remoção do carbono (CRE), definida através de resultados experimentais. A equação a ser usada varia em função do teor de carbono final do aço produzido, sendo expressa como:

$$\%Cr_{previsto} = \frac{V_{O_2}}{CRE} \cdot 0,0035$$

Onde:

V_{O_2} – Volume de oxigênio soprado após a realização da amostragem durante a fase de descarburação (Nm³)

CRE – Eficiência de remoção do carbono. Para aços com teores de carbono maiores que 0,08% é igual a 35% e para aços com teores de carbono inferiores a 0,08% o CRE é de 12%.

Anexo 5 - Tela do modelo TOP-AOD e Carbometria do AOD-L da ArcelorMittal Inox Brasil.

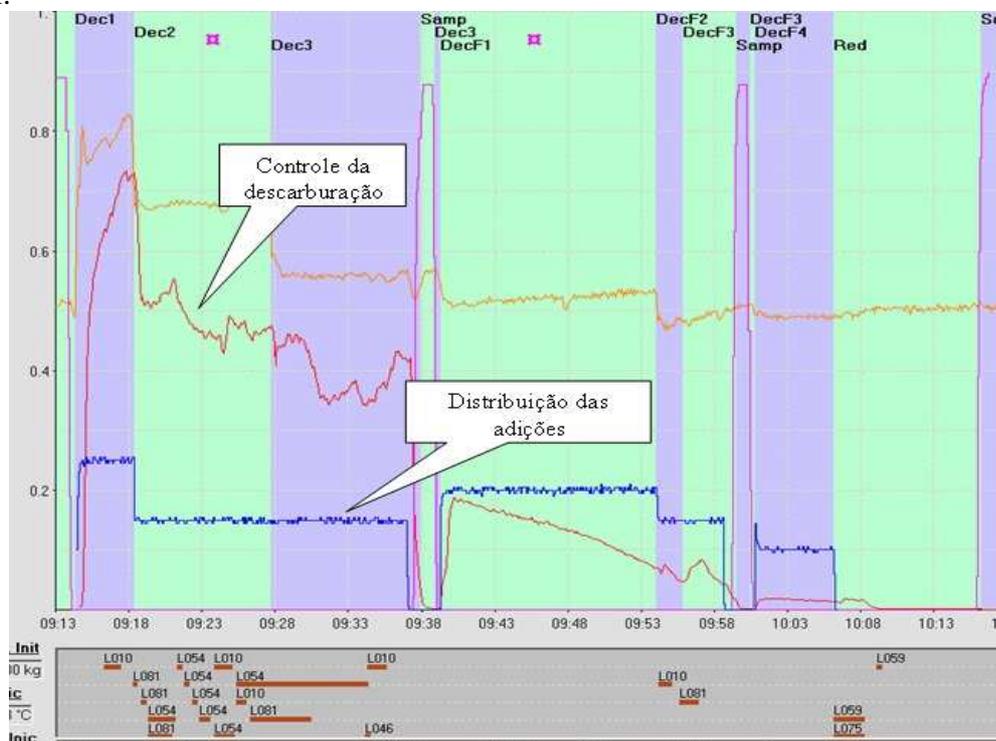


Figura 8.2 - Controle da curva de descaburação e de adições de ligas controladas pelo modelo TopAOD e pela carbometria.