

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

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL  
DE UM CONVERTEDOR LD ATRAVÉS DO DESENVOLVIMENTO  
DO PROCESSO DE SOPRO COM LANÇA DE QUATRO FUROS

Autor: Alin Júnior Machado Chaves

Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro

Coorientador: João Baptista Romão

Fevereiro – 2006

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

Alin Júnior Machado Chaves

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL  
DE UM CONVERTEDOR LD ATRAVÉS DO DESENVOLVIMENTO  
DO PROCESSO DE SOPRO COM LANÇA DE QUATRO FUROS

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. Luiz Fernando Andrade de Castro

Coorientador: João Baptista Romão

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

**Dedicatória:**

À minha esposa Shirley e meu filho Guilherme, presença sublime em todos os momentos.

À minha mãe e ao meu pai, Geralda e Alin pelos ensinamentos que me transmitiram honestidade, humildade e vontade para trabalhar.

Aos meus irmãos, Wálisson e Aline, pelo incentivo, compreensão e ajuda mútua.

## **Agradecimentos:**

A Belgo e a UFMG, por parte do Departamento de Engenharia Metalurgia, pelo apoio à realização deste trabalho.

Ao João Garcia e Marco Antônio pela confiança e orientação durante a realização do trabalho.

Ao Professor Luiz Fernando pelo apoio e discussões técnicas.

Ao João Baptista Romão pela orientação precisa, estímulo constante e disponibilidade, sempre determinado em encontrar soluções técnicas e aplicáveis ao nosso processo.

Ao Joaquim Costa pela assistência prestada em várias etapas deste trabalho.

Ao Evander Damasceno pela assistência prestada na metodologia seis sigma.

Aos colegas do staff técnico Eduardo Amaral, Wanderlei, Carlos Quaresma, Helvio, Anísio, Geraldo Arthuso, supervisores, operadores, analistas do laboratório, estagiários e todos aqueles contribuíram, seja por contribuição técnica, pedagógica e/ou operacional, para o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO .....	01
CAPÍTULO 2: OBJETIVO.....	05
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	06
3.1-Principais características da Belgo, usina de Monlevade.....	06
3.2-Lança de oxigênio .....	08
3.3-Tipos de lanças de oxigênio.....	10
3.3.1-Lança de duplo fluxo ou pós - combustão.....	10
3.3.2-Lança para sopro com jato coerente ( Cojet ).....	11
3.4-Teoria sobre o fluído dinâmico do jato de oxigênio.....	13
3.5-Comportamento do jato no bocal.....	14
3.6-Comportamento do jato fora do bocal.....	16
3.7-Projeto do bocal de lança.....	20
3.8-Refrigeração da lança.....	23
3.9-Interação do jato com o banho mecânico.....	25
3.10-Projeto da lança quatro furos da Belgo.....	28
3.10.1-Descrição da lança atual da Belgo - Usina Monlevade.....	28
3.10.2-Descrição da lança quatro furos da Belgo - Usina Monlevade.....	29
3.11-Tipos de sopro.....	30
3.11.1-Sopro macio.....	30
3.11.2-Sopro normal.....	31
3.11.3-Sopro duro.....	32
3.12-Reações no sopro.....	32

3.12.1-Descarburação.....	32
3.12.2- Dessiliciação.....	34
3.12.3- Desfosforação.....	35
3.12.4- Dessulfuração.....	36
3.12.5-Oxidação do manganês.....	38
3.12.6- Oxidação do ferro.....	39
3.13- Condições de sopro.....	40
3.14- Padrão de Sopro.....	44
3.15- Controle do Sopro.....	44
4- METODOLOGIA.....	47
4.1 – Etapa teórica.....	48
4.2 – Etapa experimental.....	48
4.3-Plano de experimento.....	49
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído.....	51
5.2-Análise das variáveis respostas.....	51
5.3. – Análise dos resultados .....	53
5.3.1- Carbono fim de sopro visado 0,030% (300 ppm) .....	54
5.3.1.1- Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído.....	54
5.3.1.2-Análise das variáveis respostas.....	54
5.3.2- Carbono fim de sopro visado 0,040% ( 400 ppm)	60
5.3.2.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído.....	60
5.3.2.2-Análise das variáveis respostas.....	60
5.3.3- Carbono fim de sopro visado 0,050% ( 500 ppm).....	66
5.3.3.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído.....	66

5.3.3.2-Análise das variáveis respostas.....	67
5.3.4- Carbono fim de sopro visado 0,060% (600 ppm).....	73
5.3.4.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído.....	73
5.3.4.2- Análise das variáveis respostas.....	73
6. CONCLUSÕES.....	80
7. TRABALHOS FUTUROS.....	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
Anexo 1 – Cálculo da Vazão máxima de trabalho	85
Anexo 2 – Cálculo de padrões de sopro para lança de quatro furos.....	87
Anexo 3 – Teste de Normalidade para as variáveis respostas.....	90

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1: Conversor LD (ROMÃO, 2002).

Figura 3.1: Fluxograma Usina Monlevade (ROMÃO, 2002).

Figura 3.2: Representação da estrutura de lança (MARTINS, 2004).

Figura 3.3: Topo do bico da lança (ROMÃO, 2002).

Figura 3.4: Jato coerente (VIANA, 2003).

Figura 3.5: Comportamento da velocidade central do jato de oxigênio com a distância, para bocal convencional e Cojet (VIANA, 2003).

Figura 3.6: Penetração dos jatos coerente e convencional no banho (BARÃO, 2004).

Figura 3.7: Bico de Lança do jato coerente (BARÃO, 2004).

Figura 3.8: Pontos de referência da estrutura da lança (GLASS, 1993).

Figura 3.9: Representação esquemática das regiões presentes ao longo do fluxo (GLASS, 1993).

Figura 3.10: Representação esquemática das regiões no jato supersônico (MARTINS, 2004).

Figura 3.11: Relação entre o comprimento do núcleo supersônico e o número de Mach (MARTINS, 2004).

Figura 3.12: Pressão máxima de impacto em função do número de Mach e da distância até a ponta da lança (MARTINS, 2004).

Figura 3.13: Quadro de fotografias do jato de ar. (94 psi) (GLASS, 1993)

Figura 3.14: Relação entre vazão de oxigênio por bocal da cabeça de lança em função da capacidade do convertedor (MARTINS, 2004).

Figura 3.15: Relação entre diâmetro interno do convertedor e o ângulo do bocal em relação ao eixo do jato (MARTINS, 2004).

Figura 3.16: Perfil térmico do bocal de lança (MARTINS, 2004).

Figura 3.17: Correlação entre ângulo e número de furos para determinar coeficiente de correção dos bocais (MARTINS, 2004).

Figura 3.18: Corte atual dos furos de lança da Belgo – Usina Monlevade (ROMÃO, 2002).

Figura 3.19: Evolução do teor de carbono no metal durante o sopro (FARIA 2004).

Figura 3.20: Evolução do teor de Si no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Figura 3.21: Evolução do teor de fósforo no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Figura 3.22: Evolução do teor de S no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Figura 3.23: Evolução do teor de Mn no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Figura 3.24: Evolução do teor de Fe no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Figura 3.25: Deformação do banho formada pelo impacto do jato (ROMÃO, 2002).

Figura 3.26: Esquema do posicionamento da lança de oxigênio durante o sopro em relação à emulsão metal-gás-escória (SCHOOP, 1981).

Figura 3.27: Valores de K para projeto de bico de lança n= 3 e quatro furos (SCHOOP, 1981).

Figura 5.1: Distribuição das corridas analisadas no experimento

Figura 5.2: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,030%

Figura 5.3: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,030%

Figura 5.4: Gráfico IMR para FeO da escória LD para carbono visado 0,030%

Figura 5.5: Gráfico IMR para temperatura fim de sopro (°C) para carbono visado 0,030%

Figura 5.6: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,040%

Figura 5.7: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,040%

Figura 5.8: Gráfico IMR para FeO da escória para carbono visado 0,040%

Figura 5.9: Gráfico IMR para temperatura fim de sopro (°C) para carbono visado 0,040%

Figura 5.10: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,050%

Figura 5.11: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,050%

Figura 5.12: Gráfico IMR para FeO escória LD para carbono visado 0,050%

Figura 5.13: Gráfico IMR para temperatura fim de sopra para carbono visado 0,050%

Figura 5.14: Gráfico IMR para tempo de sopra (min.) para carbono visado 0,060%

Figura 5.15: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,060%

Figura 5.16: Gráfico IMR para FeO escória LD para carbono visado 0,060%

Figura 5.17: Gráfico IMR para temperatura fim de sopra para carbono visado 0,060%

## LISTA DE TABELAS

Tabela III. 1: Quadro comparativo lança de três e quatro furos

Tabela V.1: Limites de trabalho das variáveis ruído

Tabela V.2: Limites de trabalho das variáveis ruído

Tabela V.3: Limites de trabalho das variáveis ruído

Tabela V.4: Limites de trabalho das variáveis ruído

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$  = densidade do líquido ( $\text{g/cm}^3$ )

$dC/dt$  = velocidade de descarburização ( $\%C/\text{min}$ ).

$L$  = profundidade de penetração em relação ao nível estático do banho (mm).

$L_0$  = altura do banho estático dentro do LD (mm).

$L / L_0$  = relação de penetração.

DOE = “Design of Experiments”

$H_0$  = hipótese para qual as médias são iguais.

$H_1$  = hipótese para qual as médias são diferentes.

$\mu_1$  = média da amostra 1.

$\mu_2$  = média da amostra 2.

TFS = Temperatura fim de sopro

CFS = Carbono fim de sopro

PFS = Fósforo fim de sopro

## RESUMO

O processo LD é responsável por cerca de 77% da produção brasileira de aço. O rápido crescimento desse processo na produção brasileira e mundial deve-se as suas características de alta produtividade, custos adequados e grande flexibilidade metalúrgica, podendo fabricar economicamente a maior parte dos tipos de aços.

Apesar do desenvolvimento do processo em menos de três décadas de existência, os princípios básicos permanecem praticamente constantes. Entretanto, desenvolvimentos consideráveis foram efetuados, não só no que diz respeito à capacidade do forno, que alcança hoje valores da ordem de 400 toneladas, mas também na sua forma, dispositivos de sustentação e basculamento na forma e número de bocais para sopro de oxigênio, ao lado do aprimoramento das técnicas operacionais.

Com aplicações de sopro adequadas, quase todas as reações de refino podem ser obtidas. Essa característica, aliada às condições favoráveis de custos, tanto de investimento quanto operacional foram responsáveis pela rápida evolução da participação do processo LD na produção mundial de aço.

Através de uma lança é soprado oxigênio de alta pureza com velocidade supersônica sobre a superfície da carga metálica. Cria-se aí uma região de impacto do jato, de altíssimas temperaturas, dando início às reações de refino e à formação da escória. O tempo de duração do sopro depende do projeto do bocal de lança e da vazão de oxigênio de trabalho, podendo estar entre 10 a 30 minutos.

Melhorar o desempenho operacional do convertedor LD da aciaria da Belgo, usina Monlevade, através do desenvolvimento do processo no uso da lança de quatro furos é o objetivo deste trabalho, sendo avaliado através dos seguintes resultados, tendo como referência os valores obtidos atualmente com a lança de três furos:

- Tempo sopra
- Rendimento metálico
- FeO da escória
- Variabilidade da Temperatura fim de sopra

Foi elaborado um plano de experimento envolvendo duas etapas, onde foram desenvolvidos padrões de sopra para lança de quatro furos e depois foram fabricadas corridas com a lança de quatro furos e comparadas com as corridas fabricadas com a lança de três furos.

Os resultados preliminares mostraram ser viável a utilização da lança de quatro furos, pois houve uma redução no tempo de sopra em média de dois minutos mantendo o mesmo desempenho nos demais parâmetros (rendimento metálico, FeO da escória, temperatura fim de sopra).

## **ABSTRACT**

Process BOF, is responsible for about 77% of the Brazilian steel production. The fast growth of this process in the Brazilian and world had a production must its adequate characteristics of high productivity, costs and the great metallurgic flexibility, being able economically to manufacture most of the types of steel.

The development of the process in less than three decades of existence, the basic principles practically remain constant. However, considerable developments had been effected, in that it not only says respect to the capacity of the BOF, that today reaches values of the order of 400 tons, but also in its form, devices of sustentation and tilting, in the form and number of nozzle for oxygen blow, to the side of the improvement of the operational techniques.

With adjusted applications of blow, almost all the refining reactions can be gotten. This characteristic, allied to the favorable conditions of costs, as much of investment how much operational they had been responsible for the fast evolution of the participation of process BOF in the world steel production.

Through the lance oxygen of high pureness with supersonic speed on the surface of the scrap is blown. A region of impact of the spurt, highest temperatures is created there, giving beginning to the reactions of refining and the formation of the slag.

The time of duration of the blow depends on the project of the lance nozzle and of the outflow of work oxygen, being able to be it enters the 10 30 minutes.

To improve the operational performance of converter LD of would aciaria of the Belgo, Monlevade plant, through the development of the process in the use of the lance of four hole is the objective of this work, being evaluated through the following results, having as reference the values gotten currently with the spear of three punctures:

- Time blowMetallic
- Metallic yeld
- FeO of the slag
- Temperature blow end

It was elaborated an experiment plan having involved two stages, where blow pattern of blow for lance of four hole had been developed and had been manufactured heats of four hole compared with the heats manufactured with the lance of three holes.

The preliminary results had shown to be viable the use of the lance of four hole, therefore performance in the too much parameters the same had a reduction in the time of blow in average of two minutes and keeping (metallic yeld, FeO of the slag, temperature blow end).

## 1- INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da fabricação de aço a oxigênio progrediu nos últimos 50 anos a partir de um conceito amplamente aceito na indústria. Em suas várias formas, a aciaria a oxigênio agora conta com 60 por cento da produção mundial de aço. Em termos de configuração básica e operação do convertedor, os principais desenvolvimentos em tecnologia de aciaria a oxigênio aconteceram entre 1950 e 1960, quando entrou em operação a primeira planta de Aciaria LD em Linz, na Áustria. A Belgo - Usina Monlevade foi à primeira usina da América do sul a implementar o processo em 1957, onde a evolução do processo nas últimas décadas tem sido feita com automação do processo.

A instalação do Processo LD trouxe vantagens consideráveis, tais como:

- Melhoria significativa na qualidade do aço;
- Maior reprodutibilidade de resultados (qualidade do aço mais constante);
- Redução significativa nos tempos operacionais;

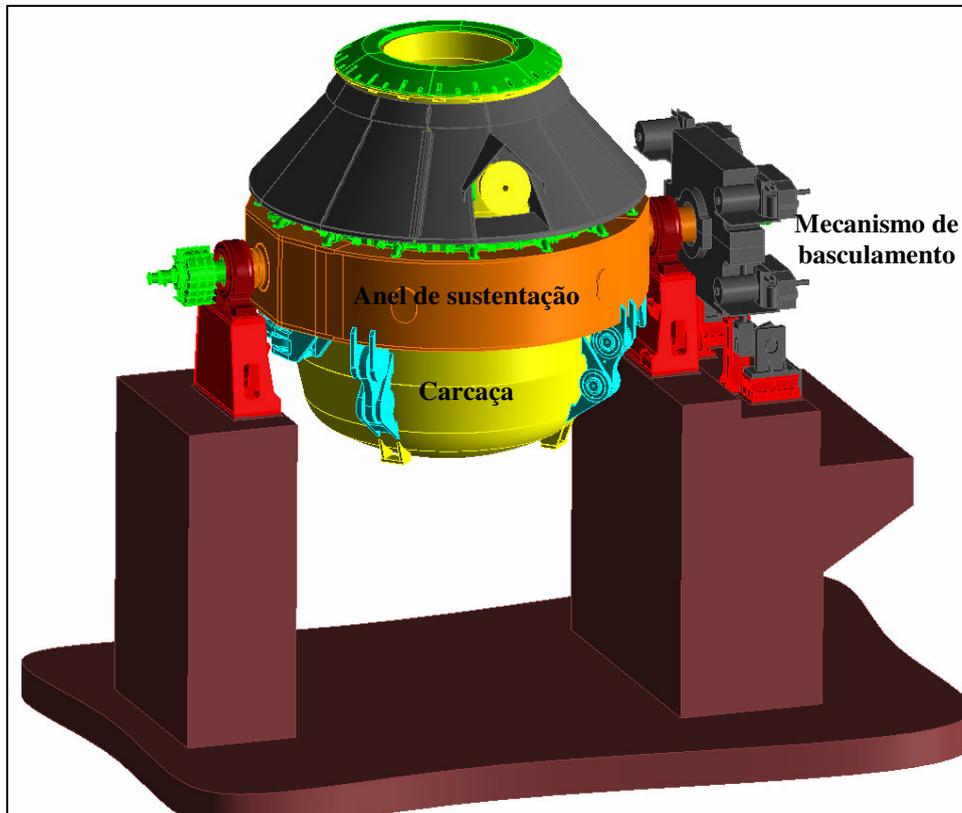
A forma básica do convertedor LD é constituída de um tronco de cone superior, cuja base menor é a boca de carregamento, uma seção central cilíndrica e outro tronco de cone invertido, fazendo a concordância do fundo com o cilindro.

A carcaça do convertedor é de chapas soldadas e normalmente ela se apóia no anel de substituição, de maneira a facilitar a sua eventual troca. O eixo de rotação é fixado no anel com um mecanismo de basculamento que permite colocá-lo em diferentes posições para carregamento, sopro e vazamento, como pode ser verificado na figura 1.1.

O ciclo de operações do LD envolve seis etapas:

- Carregamento da carga sólida
- Carregamento do gusa líquido
- Sopro
- Medição da temperatura e retirada de amostra
- Vazamento

- Vazamento da escória



**Figura 1.1: Convertedor LD (ROMÃO, 2002)**

Para o carregamento o convertedor é basculado para uma posição inclinada de cerca de  $60^\circ$  com relação a vertical. O carregamento da carga sólida (sucata) é geralmente realizado através de recipientes adequados (caixas de sucata) que são manuseadas por ponte rolantes. Após o carregamento da sucata é carregado o gusa líquido.

Terminado o carregamento do gusa líquido o convertedor é retornado a posição vertical, quando inicia-se a etapa de sopro.

Através de uma lança é soprado oxigênio de alta pureza com velocidade supersônica sobre a superfície da carga metálica. Cria-se aí uma região de impacto do jato, de altíssimas temperaturas, dando início às reações de refino e à formação da escória. O perfeito entendimento das reações de refino permite padronizar o momento e a quantidade de adição dos escorificantes necessários ao processo e estabelecer a altura da

lança de oxigênio para que se tenha estabilidade nesta etapa e reprodutibilidade dos resultados.

O tempo de duração do sopro depende do projeto do bocal de lança e da vazão de oxigênio de trabalho.

Após o término do sopro, é feita a amostragem e a medição de temperatura para avaliação dos parâmetros objetivados de composição química e temperatura do aço no final de sopro. O convertedor é basculado para a posição horizontal, a de vazamento da escória residual, e nesta posição efetuadas as amostragens.

O vazamento convertedor-panela é necessário para que se proceda a correção da composição química do aço no final de sopro para os níveis desejados no produto, para tratamentos posteriores e para o lingotamento da corrida.

O vazamento da escória residual é feito tão logo termine o vazamento do aço em pote, para ser processada ou colocada à disposição em aterros apropriados para este tipo de resíduo.

A maneira através da qual o jato de oxigênio interage com o banho metálico, tem influência marcante nas reações de refino e nas ejeções de metal/escória, afetando diretamente os resultados metalúrgicos e operacionais alcançados nos convertedores LD. Se considerarmos que essa interação pode ser definida basicamente pela relação L/Lo, ou seja, a relação entre a profundidade de penetração do jato e a profundidade do banho estático. Verificamos que um dos fatores mais importantes para a obtenção de uma adequada interação do jato de oxigênio com o banho metálico é o correto dimensionamento dos bicos de lança de oxigênio.

Se considerarmos, ainda, a contínua evolução a que são submetidos os convertedores LD, onde constantes aumentos de volume de produção e/ou produtividade, exigem vazões de oxigênio cada vez maiores, pode-se constatar que é extremamente importante

que os projetos de bicos de lança de oxigênio acompanhem de perto essa evolução, proporcionando, sempre, as melhores condições de sopro possíveis.

Será elaborado um plano de experimento envolvendo duas etapas, onde serão desenvolvidos padrões de sopro para lança de quatro furos e depois serão fabricadas corridas com a lança de quatro furos e comparadas com as corridas fabricadas com a lança de três furos, onde serão avaliados os seguintes resultados, tendo como referência os valores obtidos atualmente com a lança de três furos:

- Tempo de sopro
- Rendimento metálico
- FeO da escória
- Variabilidade da temperatura fim de sopro

## **2- OBJETIVOS**

Melhorar o desempenho operacional do conversor LD da aciaria da Belgo, usina Monlevade, através do desenvolvimento do processo no uso da lança de quatro furos.

O desempenho operacional será avaliado através dos seguintes resultados:

- Tempo de sopro
- Rendimento metálico
- FeO da escória LD
- Temperatura fim de sopro

Tendo como referência os valores obtidos atualmente com uma lança de três furos.

### 3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1- Principais características da Belgo, usina de Monlevade.

É uma usina integrada com capacidade de 1.200.000 t/ano de fio máquina. Conforme fluxograma apresentado na figura 3.1.

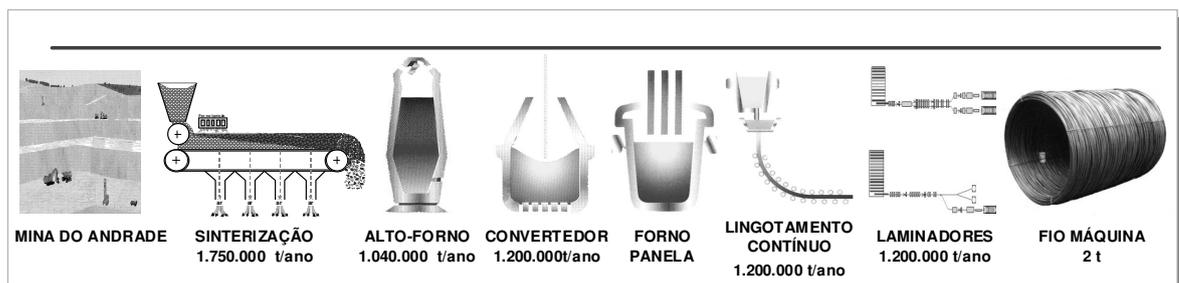


Figura 3.1: Fluxograma Usina Monlevade (ROMÃO, 2002).

- **Sinterização**

O processo consiste na aglomeração de minérios de ferro finos que juntamente com terceiras adições configura o sinter – componente da carga metálica destinada à alimentação do alto-forno para a produção do ferro-gusa líquido. A capacidade atual da planta é de 1.750.000 t/ano

- **Alto-forno**

Consiste num reator tubular vertical, em que a redução se verifica de maneira contínua. É o processo mais empregado para a produção de ferro gusa, através da redução de carga metálica (sinter e minério) utilizando-se o carbono como agente redutor por meio do princípio de contracorrente (carga e gás quente –  $\text{CO} + \text{H}_2$ ).

O gusa líquido é fornecido por um único alto-forno com capacidade de 1.030.000t/ano e tem a seguinte composição química média: 4,2%C, 0,35%Si, 0,35%Mn, 0,10%P e 0,010%S.

- **Convertedores**

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

- **Forno panela**

- Duas uma estação de refino do aço líquido, equipada com eletrodos de grafite e uma abóbada refratária que acopla na panela de aço. Além da metalurgia secundária, faz o acerto da composição química e o ajuste da temperatura através dos eletrodos com utilização da energia elétrica.

- Todo o aço produzido segue o fluxo de produção LD, Forno panela, lingotamento contínuo.

- 

- **Máquina de lingotamento contínuo**

- 

Equipamento que se encarrega da transformação do aço líquido em barras de aço denominadas tarugos. O processo de solidificação do aço é conseguido através do vazamento do aço líquido em moldes de cobre e refrigerados a água.

- 

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

- 

- 

-

- **Laminadores**

- Equipamentos destinados à produção de fio-máquina através de conformação a quente. São dois laminadores, o nº 1 com capacidade de produção de 650.000 t/ano de fio-máquina nas faixas de bitola de 5,5 a 16,0mm e o nº 2 com capacidade de produção de 550.000 t/ano de fio-máquina nas faixas de bitola de 5,5 a 32,0mm.

- **Mix de produção**

O “mix” de produção da usina de Monlevade é bastante variado para atender diversos segmentos. Os principais são: automotivo, cordoalhas para pneus, parafusos em geral, eletrodo, lã de aço, molas e cabo de aço. Desse “mix”, o principal é a cordoalha para pneu (Steel Cord) que atualmente representa em torno de 35% do total do fio máquina produzido, sendo boa parte destinado à exportação.

### **3.2-Lança de oxigênio**

A principal função da lança de oxigênio no refino do aço, em convertedores, é o fornecimento de oxigênio para eliminação de algumas impurezas contidas na carga metálica e a redução do tempo de processamento de fabricação do aço. Traduzindo de forma mais científica o jato de oxigênio é transferido para o banho metálico criando turbulência requerida para induzir as reações de refino.

Nas primeiras aplicações comerciais do processo LD, foram utilizadas lanças com um único furo central em convertedores de 30 a 100 toneladas. Com a entrada em operação de unidades de tamanhos maiores de convertedores, objetivando-se manter a mesma produtividade sem aumentar o tempo de refino, elevou-se as vazões de oxigênio, mas este aumento de vazão causou efeitos colaterais, tais como:

- Penetração profunda do jato no interior do banho metálico afetando o revestimento refratário;
- Projeções de escória e de metal decorrentes de perturbações no sopro;
- Deficiência de desfosforação.

Devido à ocorrência destes fatos, estudos direcionaram para a utilização de lanças com vários furos.

A lança está localizada, quando fora da condição de sopro, acima da boca dos fornos e centralizada em relação ao convertedor. É fixado em carros que se movimentam sobre trilhos sustentados por guinchos acionados por motores elétricos.

A lança de oxigênio (figura 3.2) pode ser dividida estruturalmente em três partes:

- Corpo: constituído por três tubos de aço carbono, sem costura e concêntricos, onde o tubo interno tem a função de transportar o oxigênio, o tubo intermediário e o externo, são utilizados para saída e entrada de água respectivamente, com objetivo de refrigeração da lança como um todo.

- Extremidade superior: estão conectados as mangueiras de oxigênio e de água, e na outra extremidade está soldado o bico da lança.

- Bico: peça única de cobre eletrolítico, fundida ou forjada, com pureza mínima de 99,9% de cobre com a finalidade de se obter elevada condutividade térmica.

O conjunto bocal/lança é imposto em severas condições de trabalho, como por exemplo, proximidade da superfície do metal líquido, ou mesmo imerso na emulsão metal-gás sólido, sobre efeito de temperaturas elevadas; possibilidade de impacto de sucatas ou mesmo rebotes do jato de oxigênio sobre materiais sólidos sobrenadantes; desgastes dos furos por altas velocidades do oxigênio, ou até mesmo fora de operação como, durante remoção de cascão aderido.

É bom ressaltar a potenciabilidade das conseqüências no caso de um vazamento da água, que continuamente circula para promover refrigeração. Esta poderá entrar em contato com o metal líquido a 1600°C, com possibilidade de ocorrer dissociação da água gerando gases e explosões.

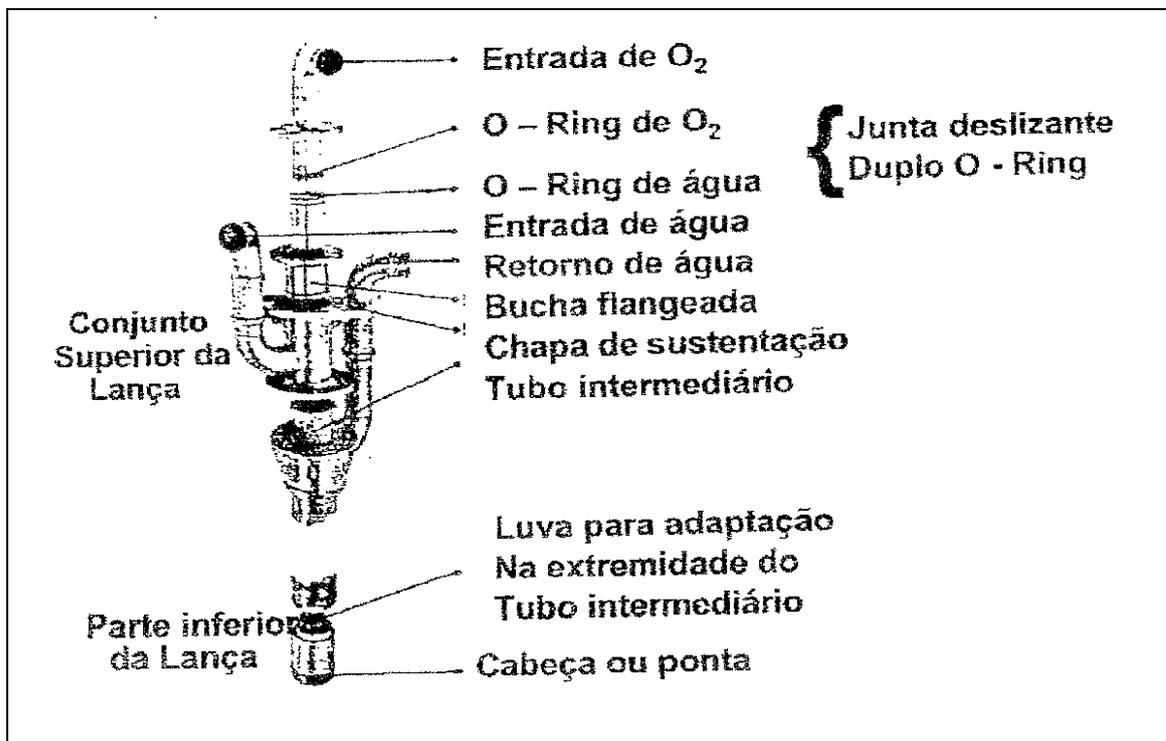


Figura 3.2: Representação da estrutura de lança (MARTINS, 2004).

### 3.3-Tipos de lanças de oxigênio

#### 3.3.1-Lança de duplo fluxo ou pós - combustão

A lança de duplo fluxo, Romão (2002), foi projetada com a finalidade de propiciar um maior enforamento de sucata.

O processo se baseia na combustão do carbono do banho pelo jato de oxigênio primário formando o CO pela reação  $C_{(s)} + 1/2 O_{2(g)} = CO_{(g)}$  e a combustão deste gás pelo oxigênio soprado pelo fluxo secundário pela reação  $CO_{(g)} + 1/2 O_{2(g)} = CO_{2(g)}$ .

Esta combustão, quando bem orientada, proporciona um aumento no enforamento de até 40 kg/t de sucata por tonelada de gusa líquido.

Nessas condições o que realmente importa é a taxa de combustão em que o CO seria convertido em CO<sub>2</sub> em função do teor de carbono do metal, e a eficiência de transferência de calor para o banho sem maiores danos para ao revestimento refratário.



Figura 3.3: Topo do bico da lança (ROMÃO, 2002).

### 3.3.2-Lança para sopro com jato coerente (Cojet)

O jato coerente consiste na utilização de um gás combustível, como gás natural ou GLP, para promover uma chama envolvente nos jatos supersônicos de oxigênio. A figura 3.4 mostra uma foto do jato cojet, obtida em laboratório.



Figura 3.4: Jato coerente (VIANA, 2003).

O conceito fundamental desta tecnologia está ligado ao projeto de uma lança e do respectivo bico para dar coerência aos jatos supersônicos de oxigênio, através da chama de proteção formada por jatos de oxigênio e GLP.

Deste modo, eles manterão suas características originais por uma distância maior que a apresentada pelos jatos originados de bicos convencionais. Isto permite o controle do sopro com uma força de penetração no banho que dá ao processo maior flexibilidade e estabilidade. A figura 3.5 mostra um gráfico comparando a velocidade do jato cojet com o convencional, a partir da origem.

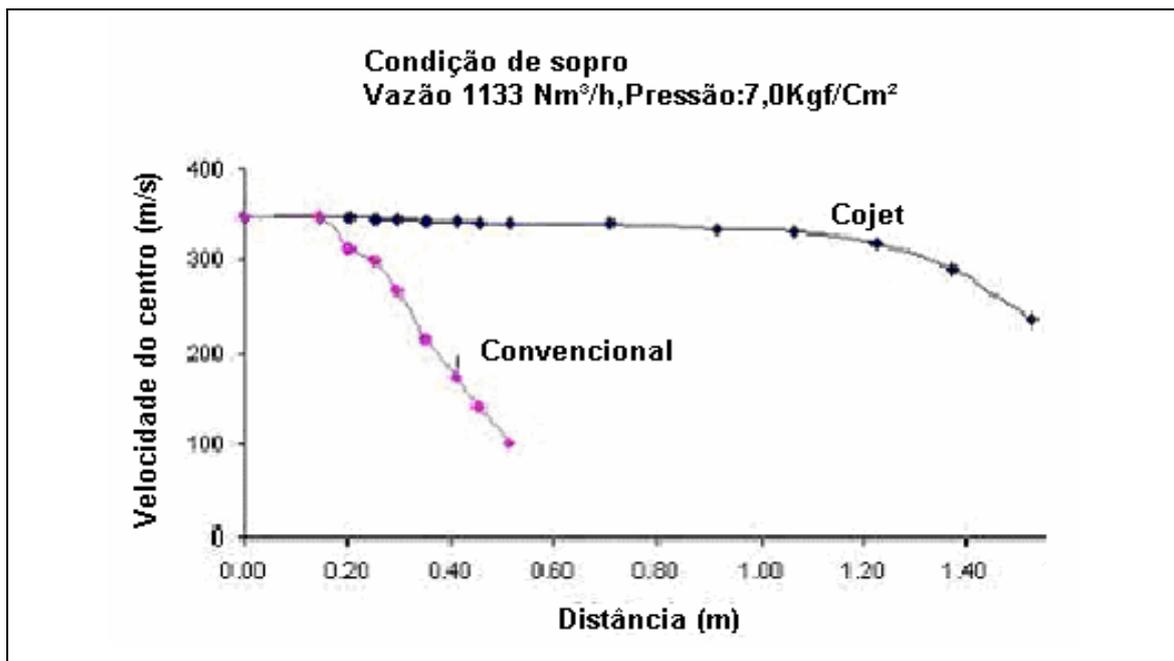


Figura 3.5: Comportamento da velocidade central do jato de oxigênio com a distância, para bocal convencional e Cojet (VIANA, 2003).

A figura 3.6 ilustra a concepção do uso do jato coerente em um convertedor em comparação com o jato de lança convencional.

O desenvolvimento do projeto otimizado do bico para jato coerente foi realizado após diversas experiências em campo. A melhor configuração dos bocais de penetração foi a disposição dos jatos de oxigênio, conforme mostra esquematicamente a figura 3.7.

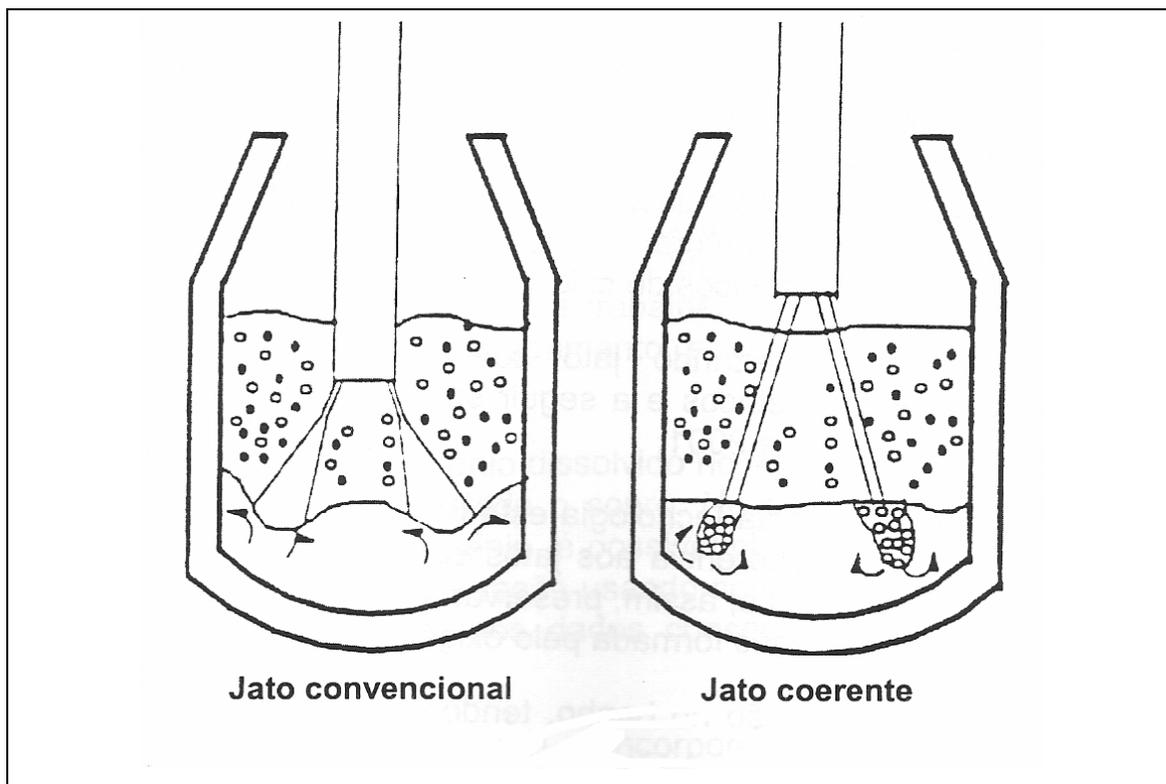


Figura 3.6: Penetração dos jatos coerente e convencional no banho (BARÃO, 2004).

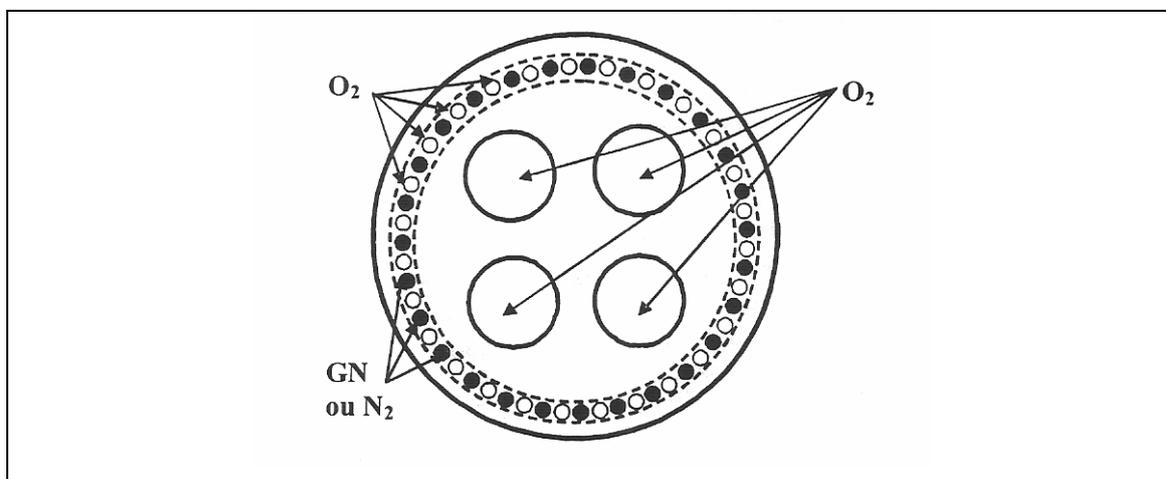


Figura 3.7: Bico de Lança do jato coerente (BARÃO, 2004).

### 3.4-Teoria sobre o fluido dinâmico do jato de oxigênio

Para se obter as equações que governam o fluxo de oxigênio através de um bocal de uma lança, devem ser estabelecidas às condições de contorno e fluxo de gás

unidimensional isto significa adotar que a velocidade, temperatura, pressão, densidade como constantes em relação a um plano de uma seção transversal do duto e utilizando o valor médio encontrado nesta seção para as grandezas em questão. A vazão de gás através do duto constante, não havendo troca de calor para fora ou para dentro do gás enquanto estiver escoando dentro do duto. Os efeitos de atrito nas paredes do duto assumidos como desprezíveis.

### 3.5-Comportamento do jato no bocal

Sob as condições descritas, analisando um reservatório contendo um gás perfeito e em condições de estagnação, é possível aplicar a equação de Bernoulli e a partir da equação da continuidade estabelecer, para uma seção qualquer do duto da figura 3.8 a equação (3.1):

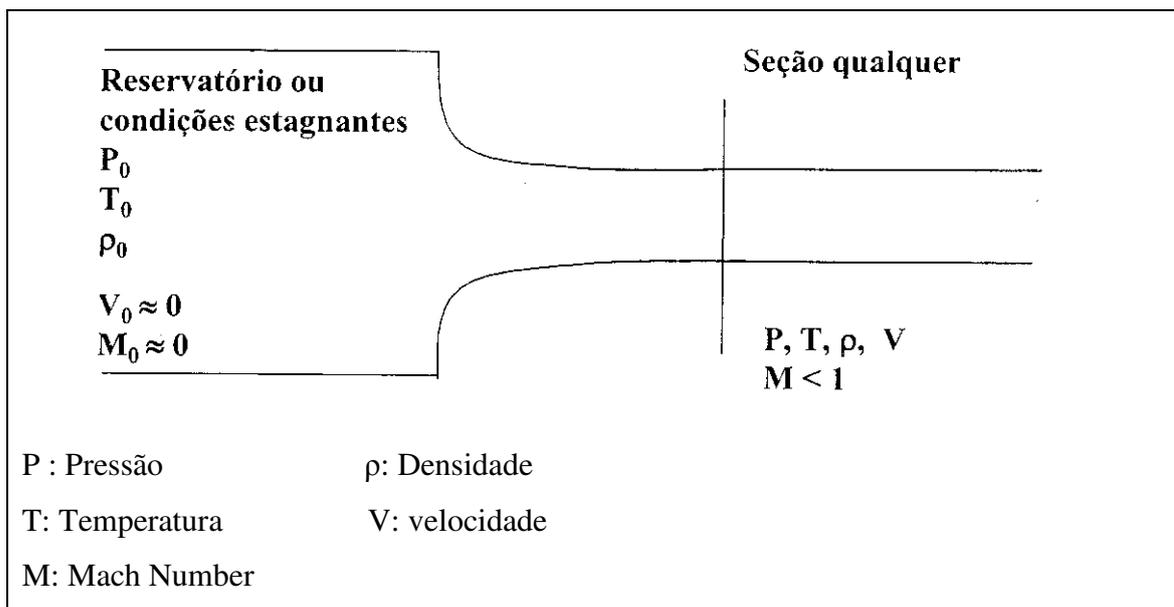


Figura 3.8: Pontos de referência da estrutura da lança (GLASS, 1993).

$$\frac{dA}{A} = \frac{dV}{V} * (M^2 - 1) \quad (3.1)$$

Sendo:

A: área da seção transversal do duto (cm<sup>2</sup>)

V: Velocidade (cm/s)

M: “Mach number”, termo este utilizado para quantificar a relação entre a velocidade do gás em qualquer posição para a velocidade do som nessa mesma posição, definido por (3.2):

$$M = \frac{V}{a} \quad (3.2)$$

M: Mach number

V: Velocidade (cm/s)

a: Velocidade do som (cm/s)

Pode-se dizer, portanto que nas aciarias atuais o “Mach Number” das lanças de oxigênio pode variar de 1 a 2,35.

Os jatos de gases, neste caso oxigênio, podem ser separados em dois grupos: Subsônico e supersônico. Esta divisão refere-se à velocidade do gás na saída do bocal ser maiores ou menores que a velocidade do som no gás.

No caso do oxigênio a 27°C, a velocidade crítica ou velocidade do som é 32000 cm/s. Esta velocidade aumenta com a raiz quadrada da temperatura.

Analisando a equação 3.1, para um escoamento subsônico, ou seja,  $M < 1$ , um valor de  $dV/V$  positivo, ocorrerá quando o valor de  $dA/A$  for negativo, traduzindo para um aumento da velocidade se faz necessário 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. Neste caso é a única área do bocal a ter um escoamento sônico.

Quando  $M > 1$ , valores positivo de  $dV$  ocorrerão somente se  $dA$  for positivo. Isto é, há necessidade de aumentar a seção de saída, a partir da seção mínima, para obter aumento de velocidade do fluxo.

Concluindo, 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.

### **3.6-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, havendo necessidade de aprofundar análise em comportamento de jato subsônico, para melhor entendimento do que ocorre em 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, momento, 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 deste, mas reduzindo a velocidade ao longo do tempo. A interação entre os dois meios ocorre nas interfaces, desenvolvendo um gradiente de velocidade, temperatura e massa com um perfil de distribuição normal em relação à linha de centro do jato. A configuração descrita é representada na figura 3.9, esquematicamente subdividida em 3 regiões.

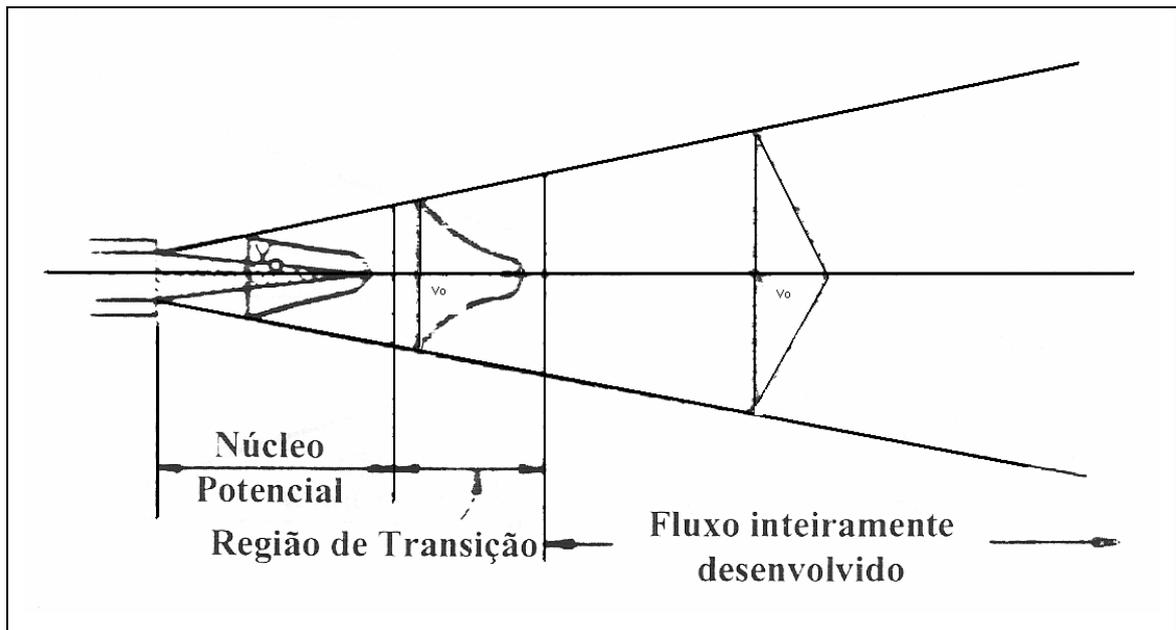


Figura 3.9: Representação esquemática das regiões presentes ao longo do fluxo (GLASS, 1993).

Na região inicial de núcleo potencial, com distancia 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 ao 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, porem neste caso supersônico.

Na região seguinte a do núcleo potencial, a velocidade no centro do jato decresce, mantendo-se maior do que a velocidade do som. Esta região a qual a velocidade axial do jato é maior do que a velocidade sônica é denominada como cone supersônico, e inclui o núcleo potencial, conforme apresentado na figura 3.10.

Além do cone supersônico, encontra-se uma região subsônica, similar à região de fluxo totalmente desenvolvida em um jato subsônico.

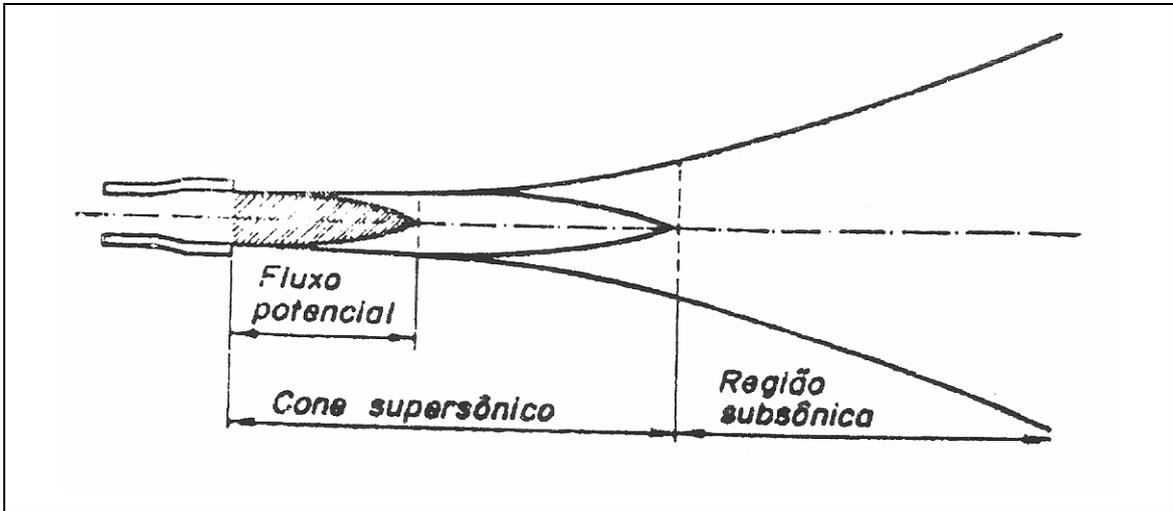


Figura 3.10: Representação esquemática das regiões no jato supersônico (MARTINS, 2004).

Trabalhos realizados por Martins(2004), apresentam, figura 3.11, a relação entre a velocidade de saída do bocal (em termos de “Mach number”) e o comprimento do cone supersônico (em termos da distancia a partir da saída do bocal e os diâmetros da garganta e saída do bocal).

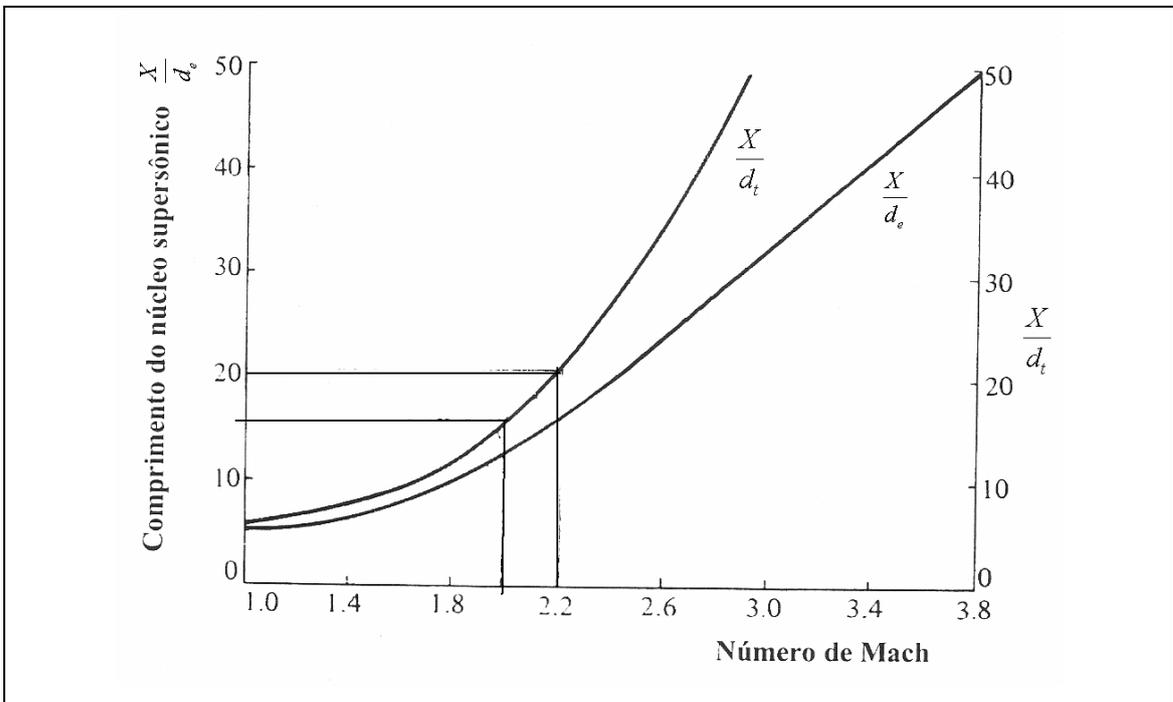


Figura 3.11: Relação entre o comprimento do núcleo supersônico e o numero de Mach (MARTINS, 2004).

Para jatos supersônicos, a pressão de impacto do centro do jato tem sido correlacionada como uma função da distancia a partir da saída do bocal (figura 3.12).

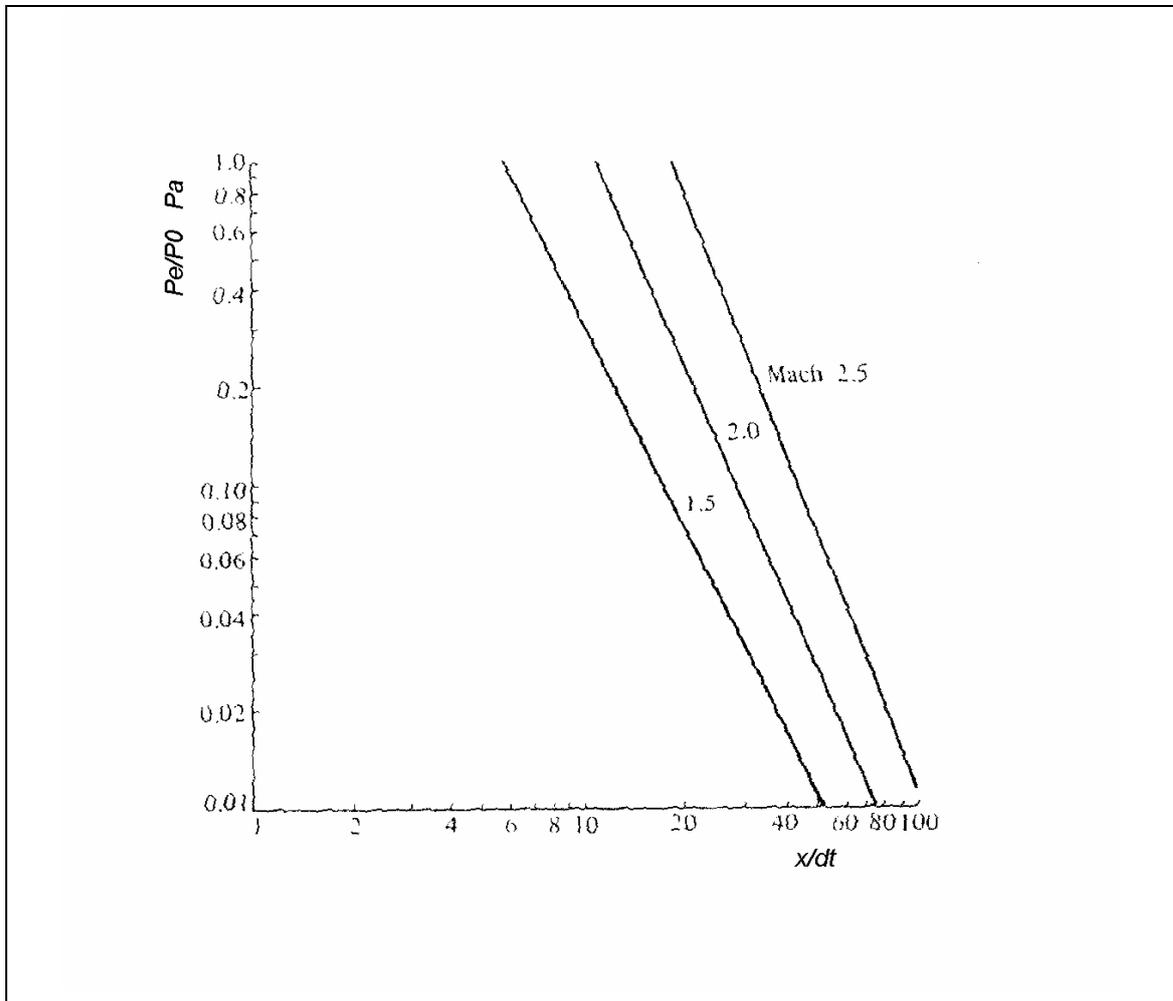


Figura 3.12: Pressão máxima de impacto em função do numero de Mach e da distancia até a ponta da lança (MARTINS, 2004).

Pode-se considerar natural, em todo escoamento supersônico, o surgimento de ondas de choque, resultantes de alterações na pressão ou na direção dos gases.

Em função da diferença de pressão entre o jato na saída do bocal, a pressão do ambiente circundante ao jato, ocorre um processo de ajuste, estabelecido por uma serie de choque 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 no jato na saída do bocal é menor que a pressão atmosférica, há uma imediata contração no sentido de equalização das pressões, surgindo ondas de choque, caracterizando um caso de jato superexpandido (figura 3.13 c). Por outro lado se a pressão do jato é 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 subexpandido (figura 3.13 a).

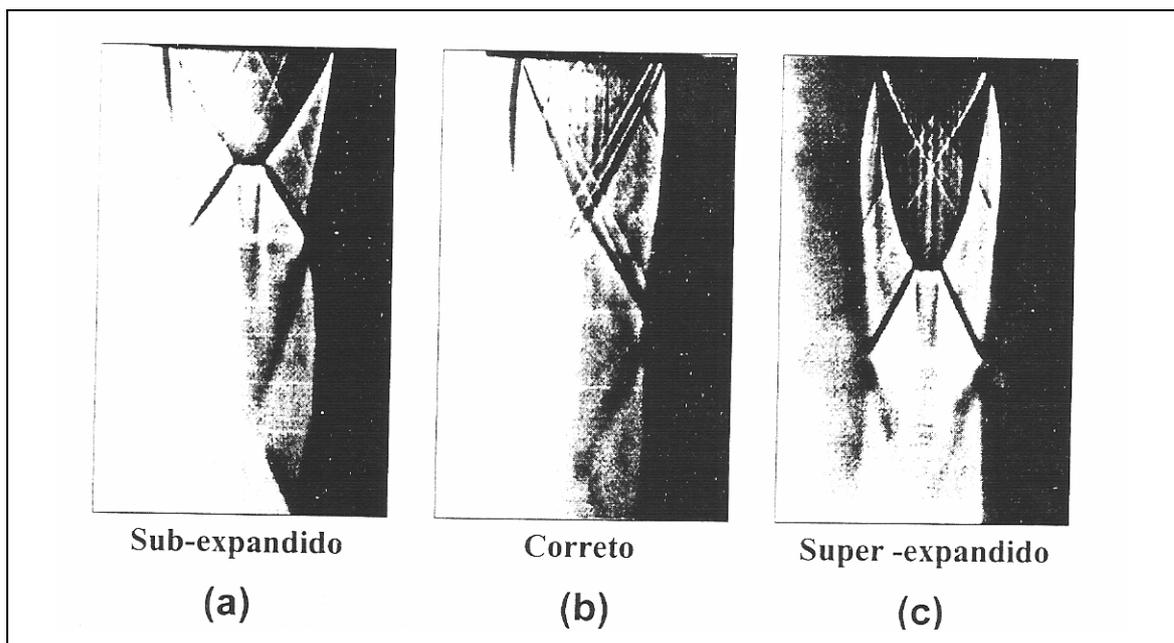


Figura 3.13: Quadro de fotográficas do jato de ar. (94 psi) (GLASS, 1993)

### 3.7-Projeto do bocal de lança

A vazão requerida para otimização dos tempos operacionais, associada à eficiência das reações do processo, adequada para as dimensões do convertedor e também a pressão respectiva possível de ser obtida, após as válvulas de controle de vazão, é o ponto de partida para a definição de um projeto de cabeça de lança de oxigênio.

Conforme mencionado no início do capítulo o aumento do tamanho dos convertedores gerou a necessidade de aumentar as vazões de oxigênio. A opção de lanças com um único bocal não comprometeriam o tempo de mistura e, conseqüentemente as relações de refino. Entretanto, elevadas vazões em um único bocal forneceriam altas pressões de impacto, que por sua vez promoveriam excessivas penetrações no banho metálico, que

resultariam em excessivas projeções. Estas projeções podem arremessar materiais (metal / escória) para fora do vaso e/ou causar danos ao revestimento refratário.

A solução experimental encontrada foi a utilização de lanças com multi furos. A complexidade das interações entre jatos, não permitiu até a presente data uma teoria consagrada, mas estudos realizados por Anderson and John permitiram nortear as correlações entre parâmetros relacionados com as interações dos jatos e tornou-se uma base para desenvolvimentos práticos em fornos com injeção de oxigênio.

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 validas para ser aplicadas para cada orifício de uma lança multi furos.

Uma regra mundialmente aceita, formulada, com base em experiências operacionais em varias plantas, é projetar lanças com vazões em cada orifício para obter valores na faixa de 70 a 200 Nm<sup>3</sup> /min (figura 3.14).

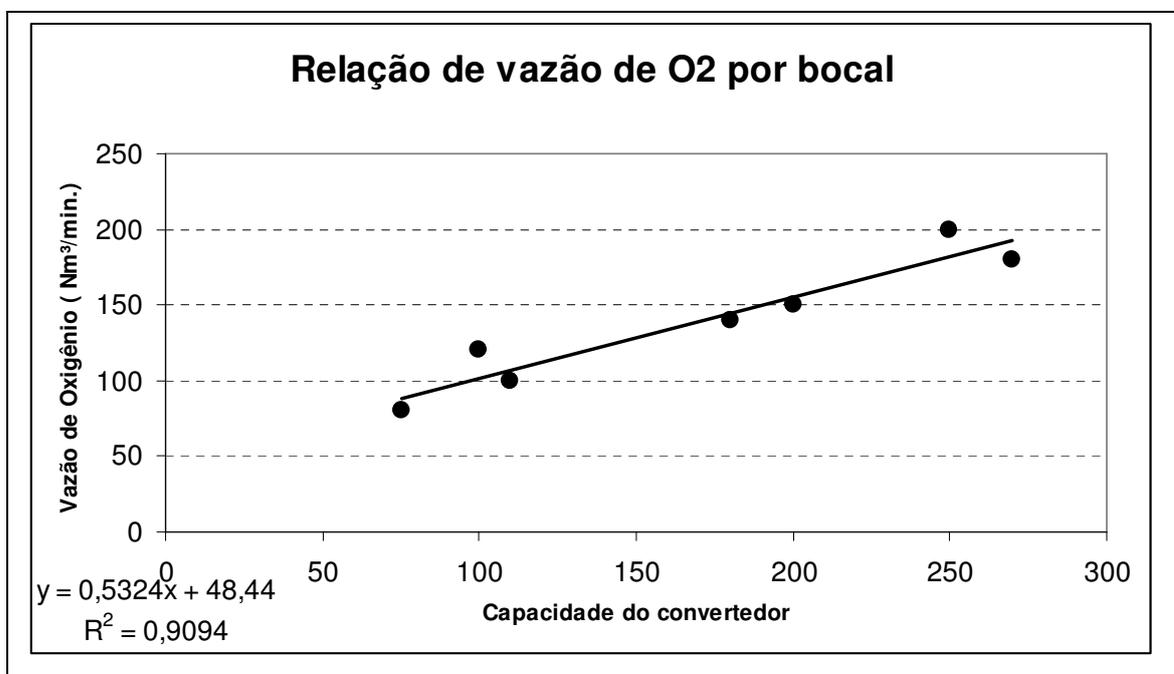


Figura 3.14: Relação entre vazão de oxigênio por bocal da cabeça de lança em função da capacidade do convertedor (MARTINS, 2004).

A região ao redor de cada jato individualmente apresenta uma tendência de arraste de ar. Esta tendência provoca uma redução na pressão na região entre os jatos, conseqüentemente puxando cada jato na direção do outro, ou seja, ao eixo central da lança. Obviamente esta tendência é maior quando a separação entre jatos diminui ou o ângulo de inclinação em relação ao centro do jato for menor. Em contra partida grandes inclinações diminuiriam a ação de penetração do jato e poderia causar áreas de impacto muito perto das paredes dos fornos. As particularidades sobre as interações entre jatos investigados por Anderson and John concluíram que para jatos com ângulos de inclinação de  $10^\circ$  ou maiores o campo de interação entre jatos são desprezíveis, na figura 3.15 temos alguns valores de ângulos de lanças em função do diâmetro interno dos convertedores.

A máxima velocidade a ser atingida na saída do bocal, conforme visto anteriormente, é determinado pela relação entre a pressão na garganta e a pressão na saída do bocal. Para uma dada velocidade, existe uma relação ótima entre a taxa de aumento da área da garganta para a área na saída do bocal. Esta permite que o gás expanda atingindo uma pressão na saída do bocal igual à pressão ambiente.

Esta condição implica que, idealmente um dado projeto de bocal é restrito para uma única vazão. Entretanto experimentos realizados por Smith mostram que valores diferindo do projeto em  $\pm 20\%$  não afetam significativamente as características do jato.

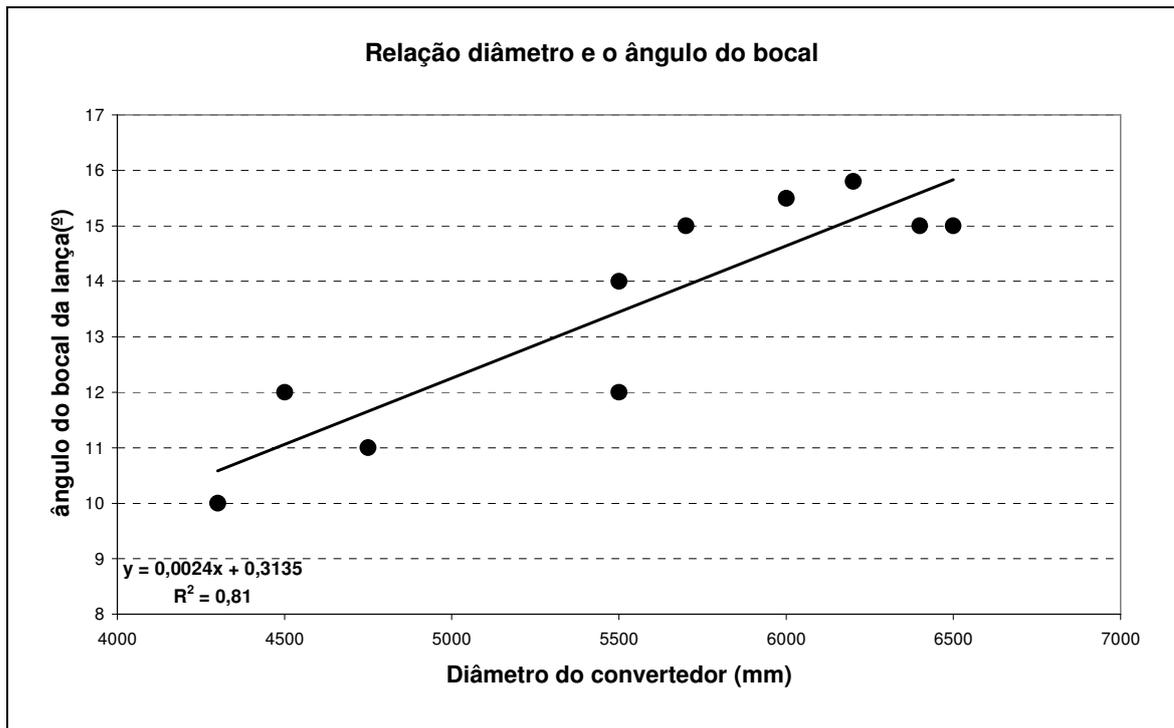


Figura 3.15: Relação entre diâmetro interno do convertedor e o ângulo do bocal em relação ao eixo do jato (MARTINS, 2004).

Considerando que durante a vida da lança, ocorre um desgaste acentuado na saída do bocal, fazendo com que a relação  $A_t / A_e$  diminua, havendo a possibilidade de obtenção de jatos super expandido, Para minimizar este efeito, recomenda-se a menor vazão possível na definição da pressão de trabalho.

Estabelecido vazão e pressão de entrada no bocal é possível encontrar através da equação (3.3), a área da seção crítica do bocal.

Finalmente com os valores de  $A_t / P_e$ , considerando a pressão na saída do bocal pressão ambiente ( $1,033 \text{ kg/cm}^2$ ), através da equação (3.4) encontra-se a área na saída do bocal.

### 3.8-Refrigeração da lança

Pode-se considerar, resumidamente, como os principais mecanismos de transferência de calor para a lança de oxigênio, a radiação da temperatura das paredes do vaso e do banho metálico; o contato com os produtos gasosos formados pelas reações, “splashing”

da mistura metal – escória – emulsão provocado pelo impacto do jato de oxigênio e algumas reações exotérmica que ocorre quase em contato com a superfície da lança.

Enquanto a parte da lança, especificamente o bico, estiver sendo resfriado adequadamente, o cobre não reagira com o oxigênio. Portanto a premissa básica a ser seguida é sempre buscar o máximo de refrigeração.

A temperatura máxima na superfície no interior lança, por segurança, é o ponto de ebulição da água ~ 100° C entre o tubo interno e o intermediário e não passa de 40° C na tubulação de saída.

A vazão de água, necessária para obter os valores citados acima, está diretamente relacionada com o fluxo de calor que emana na direção da lança, que por sua vez será função do tamanho da corrida. Os valores encontrados para convertedores acima de 200 t são acima de 250 m<sup>3</sup> / min. Reduções nas faixas de vazões abaixo da calculada aumentam a velocidade de erosão nos bocais de saída do oxigênio, conseqüentemente na vida da lança. A figura 3.16 apresenta as severas condições em que estas peças são submetidas.

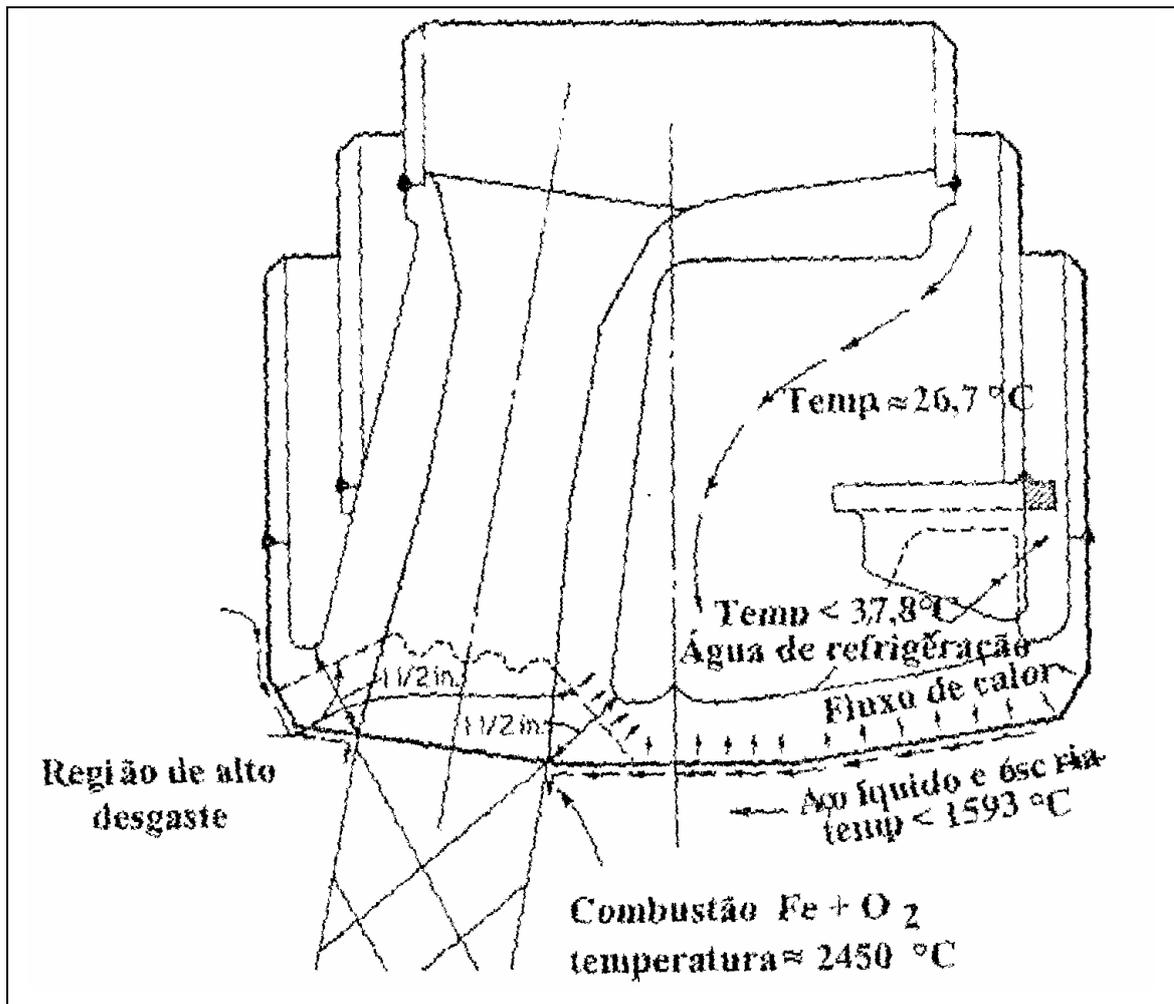


Figura 3.16: Perfil térmico do bocal de lança (MARTINS, 2004).

### 3.9-Interação do jato com o banho mecânico

O impacto do jato sobre a superfície do banho metálico transfere energia cinética causando uma depressão. Esta depressão pode ser medida por dois parâmetros, a profundidade da depressão, medida no centro do convertedor e o diâmetro da deformação, considerando o banho estático. Esta superfície deformada, não é estável oscilando no sentido vertical de forma cíclica e com rotações. Estas movimentações foram investigadas em modelos d'água.

O local do impacto do jato para dentro do banho, aonde o oxigênio reage, tem sido denominado ponto de fogo, havendo trabalhos que apresentam resultados de temperaturas nesta região, em torno de 2300 °C.

Com a evolução do tempo de sopro, a formação da fase espumosa, envolve o jato, alterando suas características quando comparado ao início do refino.

Para o cálculo da intensidade da deformação, vários desenvolvimentos matemáticos, foram elaborados, sendo que dois deles podem ser ressaltados.

O índice de padrão de sopro B-Z, calculado pela equação (3.3).

$$B - Z = \frac{\frac{Q}{nf}}{\left(\frac{dt}{10}\right) * \left(\frac{L+h}{10}\right)} \quad (3.3)$$

Onde,

Q: Vazão (Nm<sup>3</sup>/h)

nf: Número de furos

dt: Diâmetro da seção crítica (mm)

L: Profundidade de penetração do jato de O<sub>2</sub> (mm)

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

Aonde, L é a profundidade da concavidade resultado da equação (3.4).

$$L = \frac{(0,64 Q / nf - 3,6) . 10}{(d_t / 10) (h / 10)^{1/2}} \quad (3.4)$$

Onde,

Q: Fluxo por unidade de volume (Nm<sup>3</sup>/h)

nf: Número de furos

dt: Diâmetro da seção crítica (mm)

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

Geralmente valores entre 8 e 9 são considerados ideais, abaixo de 8 sopro macio e por outro lado acima de 9 sopro duro. Verifica-se na formulação acima, a limitação do modelo por não contemplar o ângulo do bocal em relação ao eixo.

O 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 ( $L_0$ ).

O valor de L é dado por:

$$L = L_{ho} * EXP(-0,78(\frac{h}{L_{ho}})) \quad (3.5)$$

L: Profundidade de penetração do jato de  $O_2$  (mm)

$L_{ho}$ : Profundidade do banho parado (mm)

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

Onde,

$$L_{ho} = 63 * (\frac{Q}{d_t})^{2/3} \quad (3.6)$$

Q: Fluxo por unidade de volume ( $Nm^3/h$ )

$d_t$ : Diâmetro da secção crítica (mm)

O valor de  $d_t$  diâmetro da secção crítica na equação 3.6, 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 (3.7)

$$d_{eq} = n_f * (\frac{d_t}{K_n}) \quad (3.7)$$

Onde,

$n_f$ : Número de furos

$K_n$ : Coeficiente de correção para inclinação dos bocais

O índice  $K_n$  é retirado da figura 3.17.

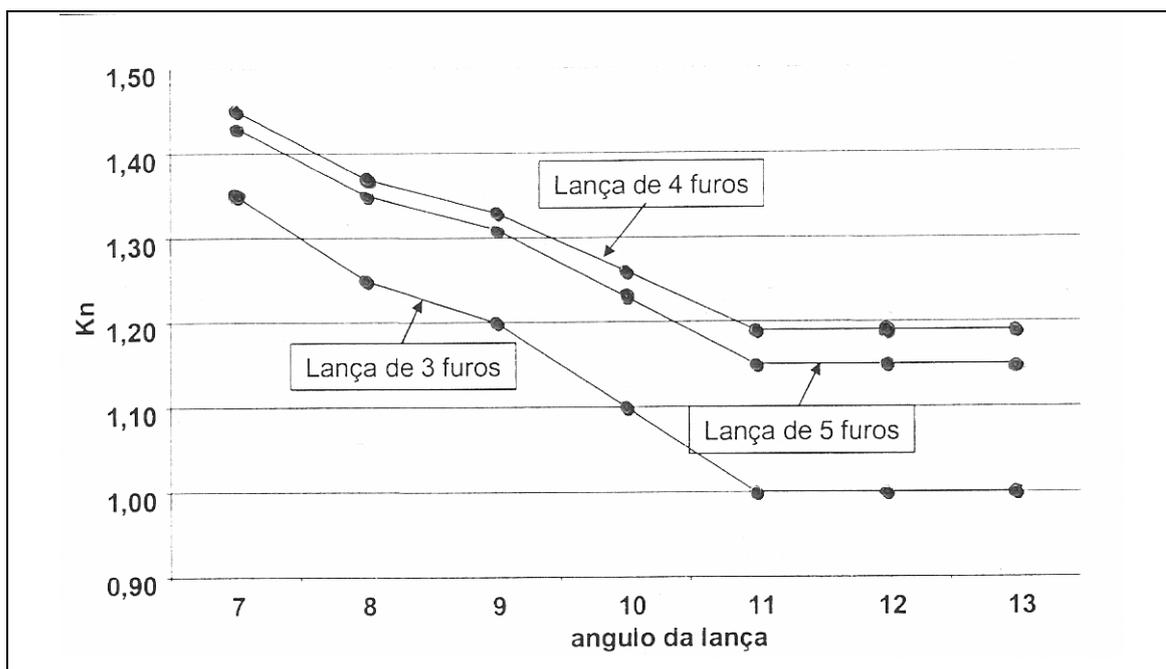


Figura 3.17: Correlação entre ângulo e número de furos para determinar coeficiente de correção dos bocais (MARTINS, 2004).

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 da lança quatro furos da Belgo

#### 3.10.1-Descrição da lança atual da Belgo - Usina Monlevade

A Belgo-Usina Monlevade é a única usina da América do Sul a utilizar lança de oxigênio com duplo fluxo ou pós-combustão.

No caso particular da lança de pós-combustão, existe um 4º tubo para a passagem do oxigênio secundário o qual viria logo após o tubo do oxigênio primário. Na figura 3.18 mostramos um corte do bico da lança de pós-combustão na qual pode ser visto os furos de saída do oxigênio primário e do secundário.

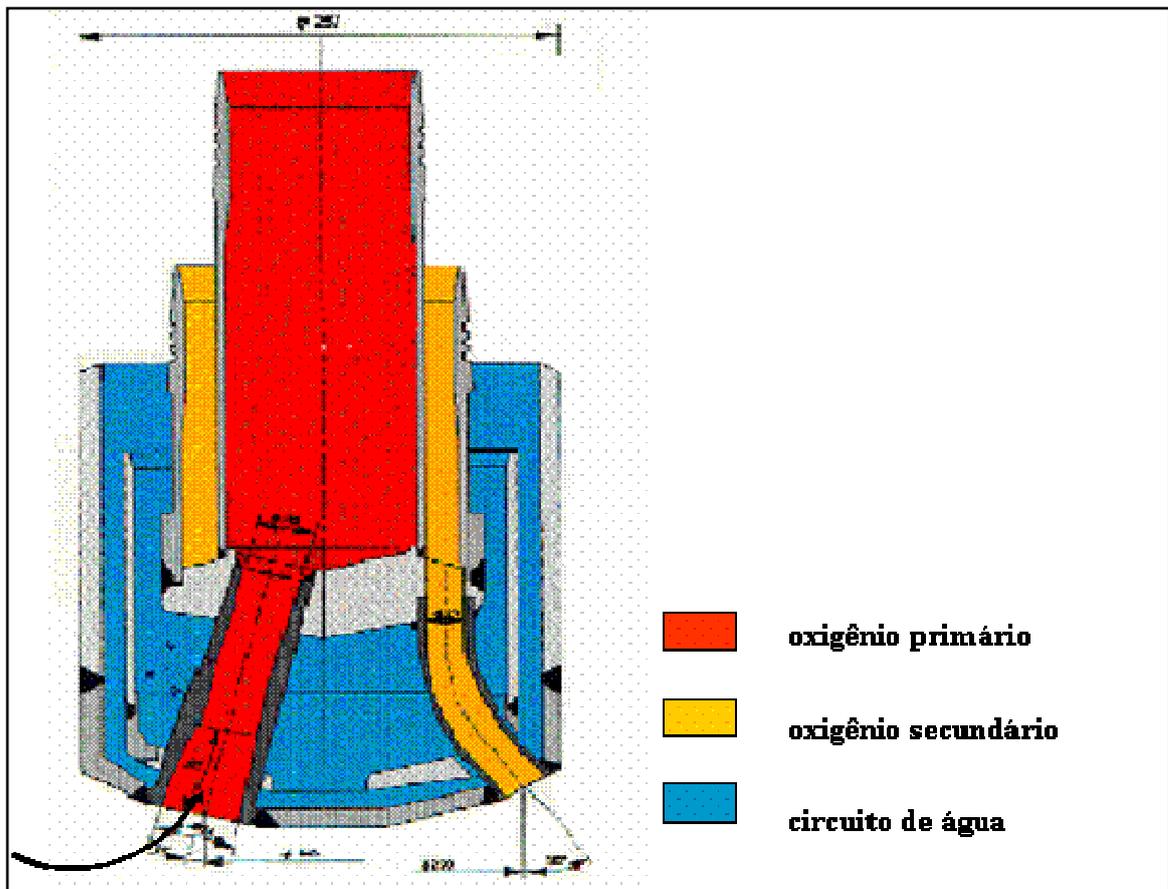


Figura 3.18: Corte atual dos furos de lança da Belgo – Usina Monlevade (ROMÃO, 2002).

A lança é substituída, quando necessário, por uma talha que a movimentada verticalmente, montada em um carro que permite o movimento no sentido horizontal para permitir a troca da lança em serviço, quando for necessário.

A lança utilizada atualmente na Belgo – Usina Monlevade é de três furos para o oxigênio primário e seis furos para o oxigênio secundário.

### 3.10.2-Descrição da lança quatro furos da Belgo - Usina Monlevade

O aumento do número de furos no bico da lança permite que se trabalhe com valores de altura da lança mais próximos dos valores calculados, sem a necessidade de se fazer grandes adições de fluorita. A possibilidade de trabalhar com valores de L/Lo mais baixo promoverá uma formação de escória mais adequada ao processo, reduzindo de

maneira significativa os inconvenientes que hoje se observam com o uso da lança de três furos.

Como será utilizada uma vazão de 480Nm<sup>3</sup>/min, segundo a figura 3.14, para convertedores com capacidade de 100 a 150 ton. , devemos trabalhar com uma vazão aproximada de 120 Nm<sup>3</sup> por bocal, será adotada uma lança de quatro furos.

O quadro comparativo abaixo mostra as principais diferenças da lança de três furos em relação à lança de quatro furos:

Tabela III.1: Quadro comparativo lança de três e quatro furos

<b>Características da lança de Oxigênio</b>	
Nº de furos para oxigênio primário	4
Nº de furos para oxigênio secundário	8
Diâmetro crítico (O <sub>2</sub> primário)	Sem alteração
Diâmetro do furo (O <sub>2</sub> secundário)	Acréscimo de 10%
Ângulo de inclinação (O <sub>2</sub> primário)	Acréscimo de 20%
Ângulo de inclinação (O <sub>2</sub> secundário)	Redução de 10%
Diâmetro externo da lança (mm)	Sem alteração
Vazão máxima de O <sub>2</sub> primário (Nm <sup>3</sup> )	Acréscimo de 20%
Pressão de O <sub>2</sub> na lança (kgf/cm <sup>2</sup> )	Sem alteração

### **3.11-Tipos de sopro**

#### **3.11.1-Sopro macio**

Com um sopro macio a escória inicial será mais oxidada e, na segunda etapa, as reações na emulsão serão acentuadas. A maior estabilização da emulsão, devido à diminuição da tensão interfacial pelo transporte de massa metal-escória aumentará o tempo de residência das partículas metálicas. Assim, apesar de a ejeção de metal ser menor a sua proporção na emulsão pode atingir valores superiores a 70%. A geração de grande volume de gases no interior da escória faz com que o volume por ela ocupado cresça, e a sua altura atingirá níveis mais elevados que no caso anterior, aumentando a possibilidade de ocorrência de transbordamentos - projeções de escória.

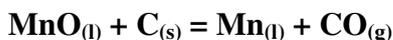
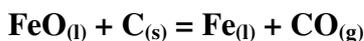
Como podemos deduzir, o sopro macio se caracteriza por Lança Alta, e/ou por uma Baixa Vazão de Oxigênio.

Neste caso, sendo a penetração do oxigênio baixa e a área de fogo grande, a geração de FeO é altamente favorecida. Assim a velocidade de descarburização torna-se baixa.

### **3.11.2-Sopro normal**

No caso de um sopro normal, a escória inicial atinge rapidamente um nível de fluidez e oxidação suficiente ao desenvolvimento da reação de oxidação pelo FeO da escória, estabilidade da emulsão pela diminuição da tensão interfacial. Na etapa intermediária atinge-se um regime estacionário em que a ejeção de metal para a emulsão equivale ao retorno de metal para o banho, e a velocidade de fornecimento de oxigênio é contrabalançada pela velocidade da reação de descarburização global (ponto de fogo + emulsão).

As reações de refino se processam de um modo tal que os riscos de projeções são minimizados. Pode ocorrer que após a queima do silício, devido a uma velocidade de descarburização mais acentuada, haja algumas ejeções de materiais não comprometendo, entretanto, o bom andamento da operação de sopro. Neste ponto o carbono ávido “por oxigênio” se encarrega de reduzir os óxidos menos estáveis na escória pelas reações:



Estas reações são responsáveis pelo aumento de gases no interior do convertedor, por este motivo, em alguns padrões de sopro a vazão do oxigênio é reduzida.

### **3.11.3-Sopro duro**

Um sopro duro acarreta uma escória inicial menos oxidada e uma maior ejeção de partículas metálicas. As reações no interior da emulsão serão, assim, prejudicadas devido a uma insuficiência de oxigênio. Também a sua estabilização é prejudicada, e o tempo de residência das partículas tende a diminuir. A reação de descarburização no ponto de fogo será acentuada, e o volume ocupado pela escória será menor, devido a menor oxidação de outros elementos formadores de óxido da escória.

Com a diminuição da velocidade de descarburização, no final do sopro torna-se possível à geração de FeO e MnO, sem contudo dispensar grandes quantidades de fluorita para dissolução da cal.

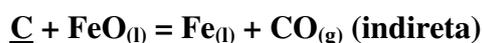
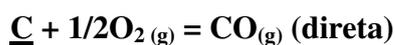
### **3.12-Reações no sopro**

A característica principal das reações químicas no processo LD é a oxidação parcial do carbono, manganês, silício e fósforo e a redução do teor de enxofre, impurezas contidas na carga metálica.

Com exceção da reação de descarburização, todas as outras estão ligadas diretamente à formação de escória do processo, responsável pelo bom desempenho da operação de sopragem.

#### **3.12.1-Descarburização**

A descarburização no convertedor LD se processa através de reações ocorridas diretamente pela oxidação do carbono na região de impacto do jato de oxigênio e indiretamente, de forma predominante, pela partição do FeO da escória:



A velocidade de descarburização evolui segundo um perfil característico, conforme o esquema da figura 3.19, permitindo a divisão do sopro em três etapas distintas, o que facilita o entendimento do processo.

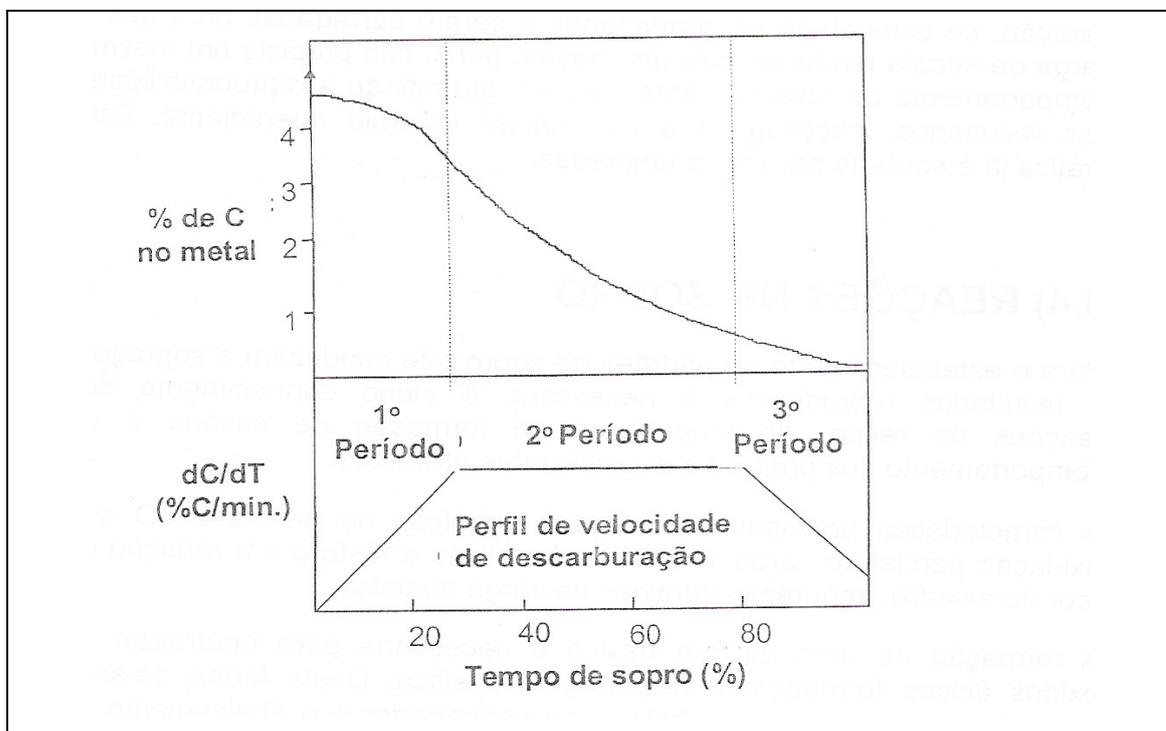


Figura 3.19: Evolução do teor de carbono no metal durante o sopro (FARIA 2004).

**Primeira etapa:** Oxidação lenta do carbono, pois ocorre simultaneamente com a oxidação dos outros elementos, principalmente silício. Ela aumenta gradativamente na medida em que o silício vai sendo oxidado, até atingir seu valor máximo, característica do segundo período de sopro.

**Segunda etapa:** Reação de oxidação do carbono, cuja velocidade só é limitada pela taxa de fornecimento de oxigênio ao banho e condições de agitação.

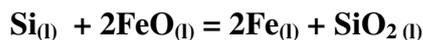
**Terceira etapa:** Diminuição da velocidade de descarburização devido à redução do teor de carbono do banho. Nesta etapa, completam-se as oxidações do manganês e fósforo até os níveis de equilíbrio, para determinadas condições operacionais, e o ferro tem oxidação acentuada.

Com base no comportamento do refino na terceira etapa, pesquisadores desenvolveram o controle dinâmico de sopro. Os equacionamentos levam em consideração a velocidade de descarburização e a elevação de temperatura no período, promovida pelas reações de oxidação do carbono e ferro.

A eficiência da descarburização é maior para sopros mais duros, o que está relacionado com a profundidade de penetração do jato de oxigênio no banho metálico.

### **3.12.2- Dessiliciação**

A reação de oxidação do silício pode ser representada por:



Devido a sua grande afinidade pelo oxigênio, o silício começa a se oxidar rapidamente, logo após o início do sopro. No final da primeira etapa, ele já foi praticamente todo oxidado e seu teor no aço de fim de sopro é extremamente baixo.

Pelo fato do silício ter uma oxidação pronunciada na parte inicial do sopro, conforme esquema da figura 3.20, é necessário criar condições favoráveis à dissolução da cal nesta etapa, para formação rápida da escória. Por esta razão, deve-se praticar sopro macio e promover a adição fluxantes ( $\text{CaF}_2$ , minério, sucata), para abaixar a temperatura de fusão dos silicatos formados.

A oxidação completa do silício geralmente se dá no máximo até 40% do tempo total de sopro, como pode ser verificado na figura 3.20.

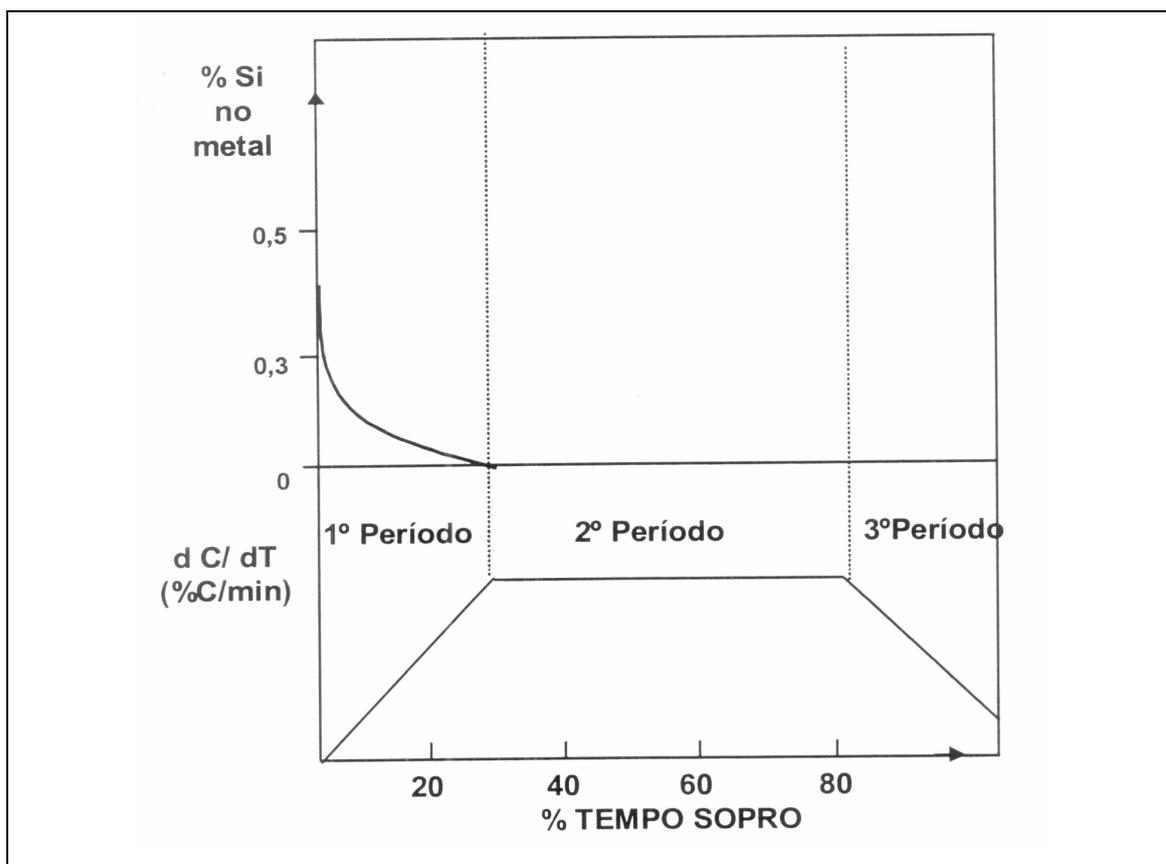


Figura 3.20: Evolução do teor de Si no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

### 3.12.3- Desfosforação

A evolução do teor de fósforo do banho metálico, no decorrer do refino em convertedores LD, pode ser analisada em três etapas distintas, caracterizadas pela taxa de descarbonização do metal líquido. No primeiro período, as condições de baixa temperatura e elevado potencial de oxigênio, conjuntamente com a dissolução da cal, favorecem a desfosforação.

Na segunda etapa, o aumento da temperatura e a diminuição do teor de FeO na escória prejudicam a desfosforação, podendo inclusive ocasionar a reversão de fósforo ao banho metálico.

Na fase final de sopro a temperatura é elevada, porém o aumento da oxidação da escória e dissolução da cal cria condições favoráveis para a remoção do fósforo, que é novamente acelerada.

As condições favoráveis à oxidação do fósforo são:

- Alto volume de escória
- Teores elevados de FeO e CaO na escória
- Baixa temperatura

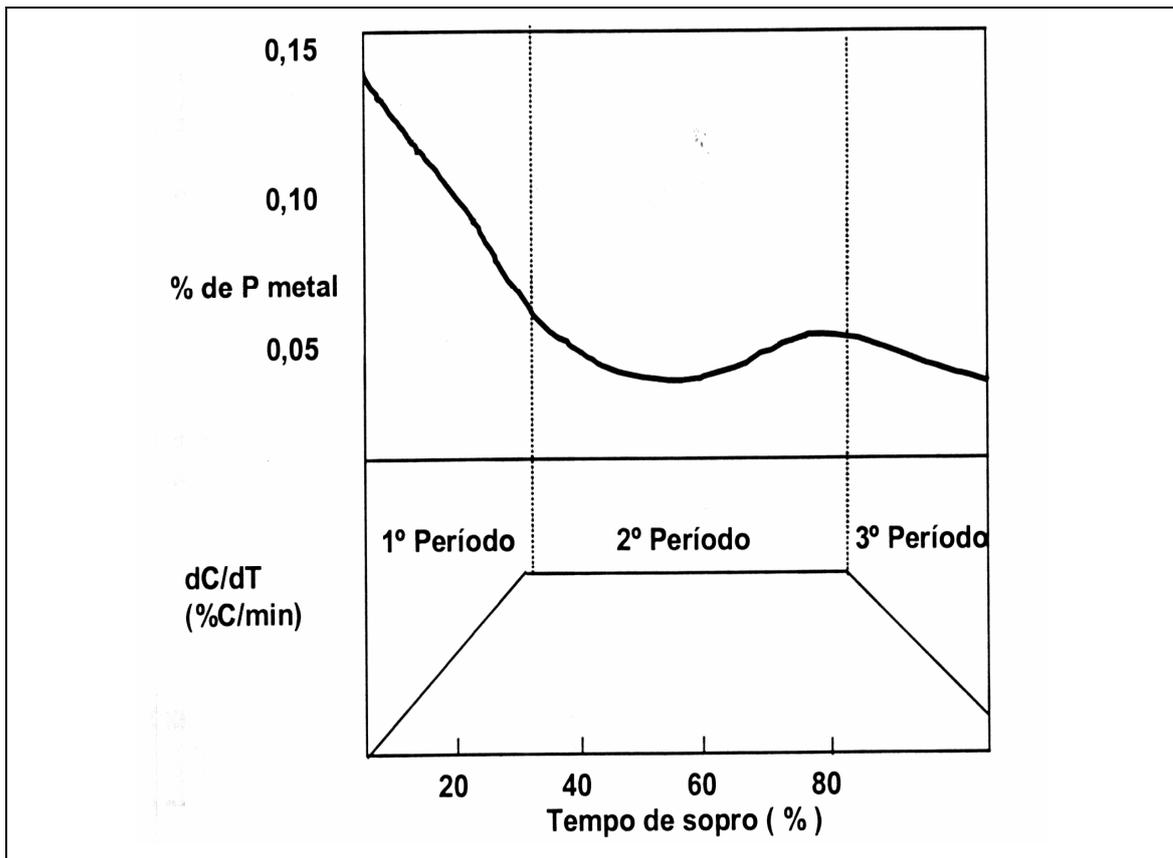


Figura 3.21: Evolução do teor de fósforo no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

Outro fator importante a ser considerado é a estabilidade do  $P_2O_5$ . Para que isso ocorra é necessário que durante o sopro a cal seja dissolvida o mais rápido possível. Sendo o FeO + MnO os solventes naturais da cal, conclui-se que o nível de oxidação da escória e do banho metálico também sejam importantes para haver uma desfosforação satisfatória.

#### 3.12.4- Dessulfuração

No refino LD, a escorificação do enxofre só se processa de forma apreciável no final de sopro, quando a aceleração da dissolução da cal eleva a basicidade a níveis adequados.

A partição do enxofre ao final do sopro é definida pela basicidade da escória, onde o teor de FeO da escória deve ser o mais baixo possível. As reações representativas da dessulfuração podem ser expressas da seguinte forma:

- $\text{CaO}_{(l)} + \underline{\text{S}} = \text{CaO}_{(l)} + \underline{\text{O}}$  (Reação na escória)
- $\underline{\text{S}} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(g)} = \text{SO}_{(g)}$  (Fase Gasosa)
- $\underline{\text{S}} + \text{O}_{2(g)} = \text{SO}_{2(g)}$  (Fase Gasosa)

A dessulfuração normalmente é realizada na estação de tratamento do gusa (ETG) por injeção de agentes dessulfurantes a base de CaO ou MgO, sendo o enxofre transportado do gusa para a escória.

Desta maneira, torna-se obrigatória a raspagem da escória de todo o gusa proveniente da dessulfuração, antes do seu enformamento.

A figura 3.22 mostra o comportamento esquemático do enxofre durante o refino.

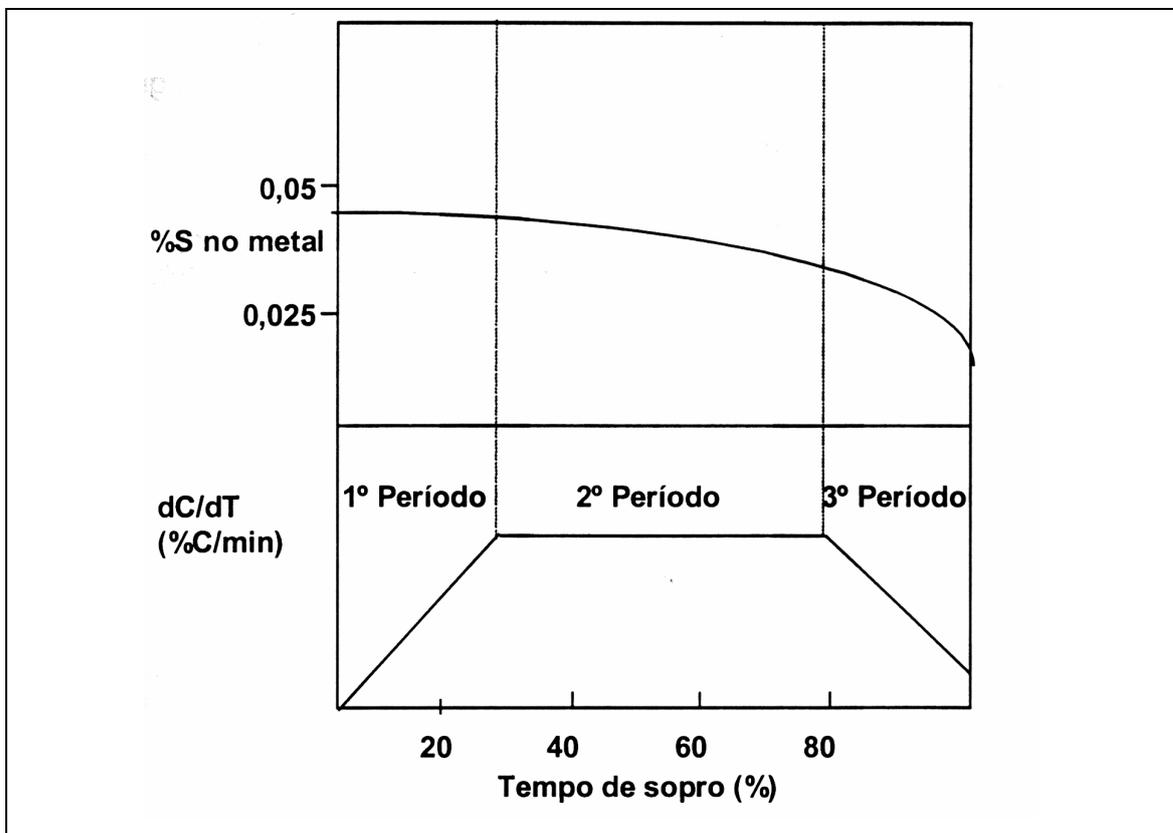
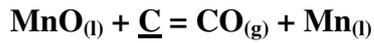


Figura 3.22: Evolução do teor de S no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

### 3.12.5-Oxidação do manganês

A oxidação do Mn na primeira etapa do sopro acompanha a do silício, porém na segunda etapa devido a avidez do carbono por oxigênio, sendo o MnO um óxido instável na escória, ocorre a sua redução. Podendo ser expressa por:



Na terceira etapa do sopro devido ao abaixamento do teor de carbono, a oxidação do manganês segue muito próxima a do ferro, guardada às devidas proporções.

A evolução do teor de Mn durante o sopro é esquematizada na figura 3.23

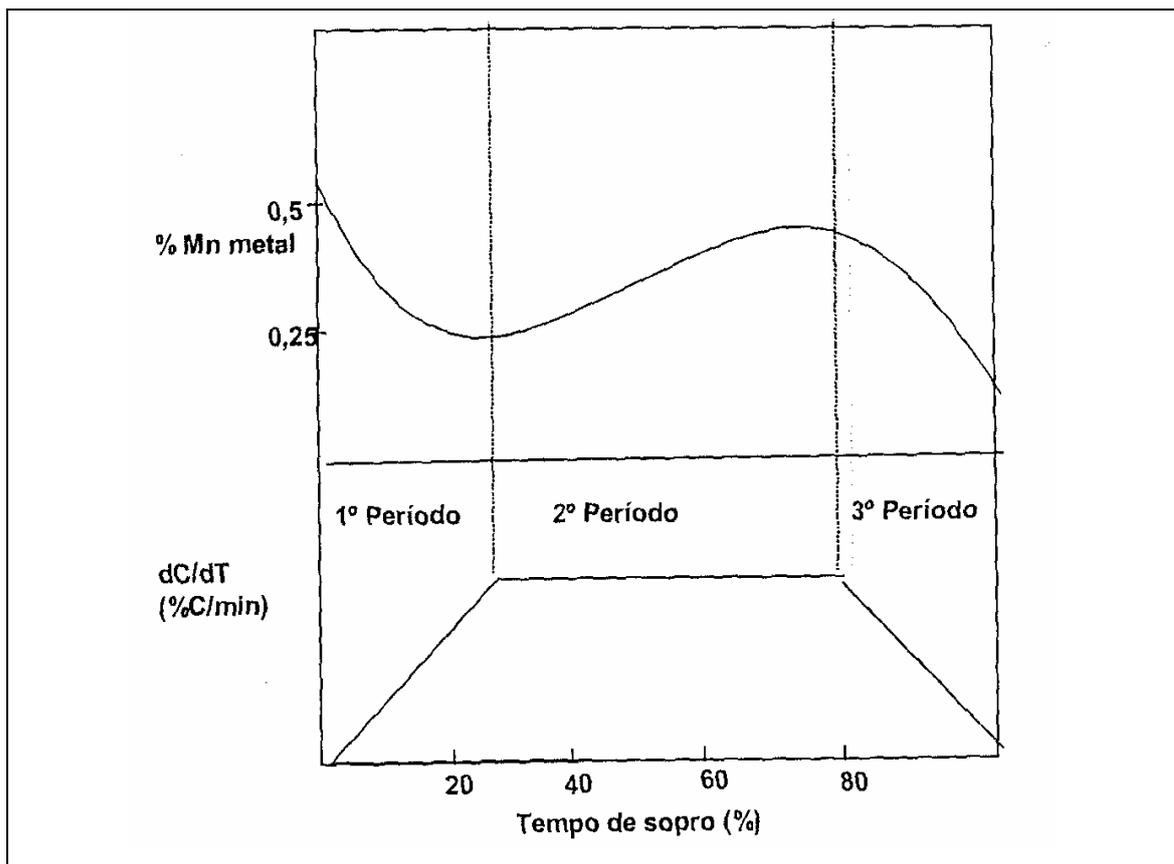
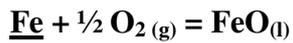


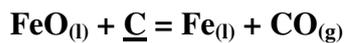
Figura 3.23: Evolução do teor de Mn no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

### 3.12.6- Oxidação do ferro

A reação de oxidação do ferro é representada por:



O comportamento desta reação é semelhante ao da oxidação do Manganês. Na primeira e terceira etapas ocorre uma oxidação acentuada do ferro, com aumento do FeO da escória. Na segunda etapa o FeO participa ativamente da descarburização através da reação:



O comportamento do ferro durante o sopro está esquematizado na figura 3.24

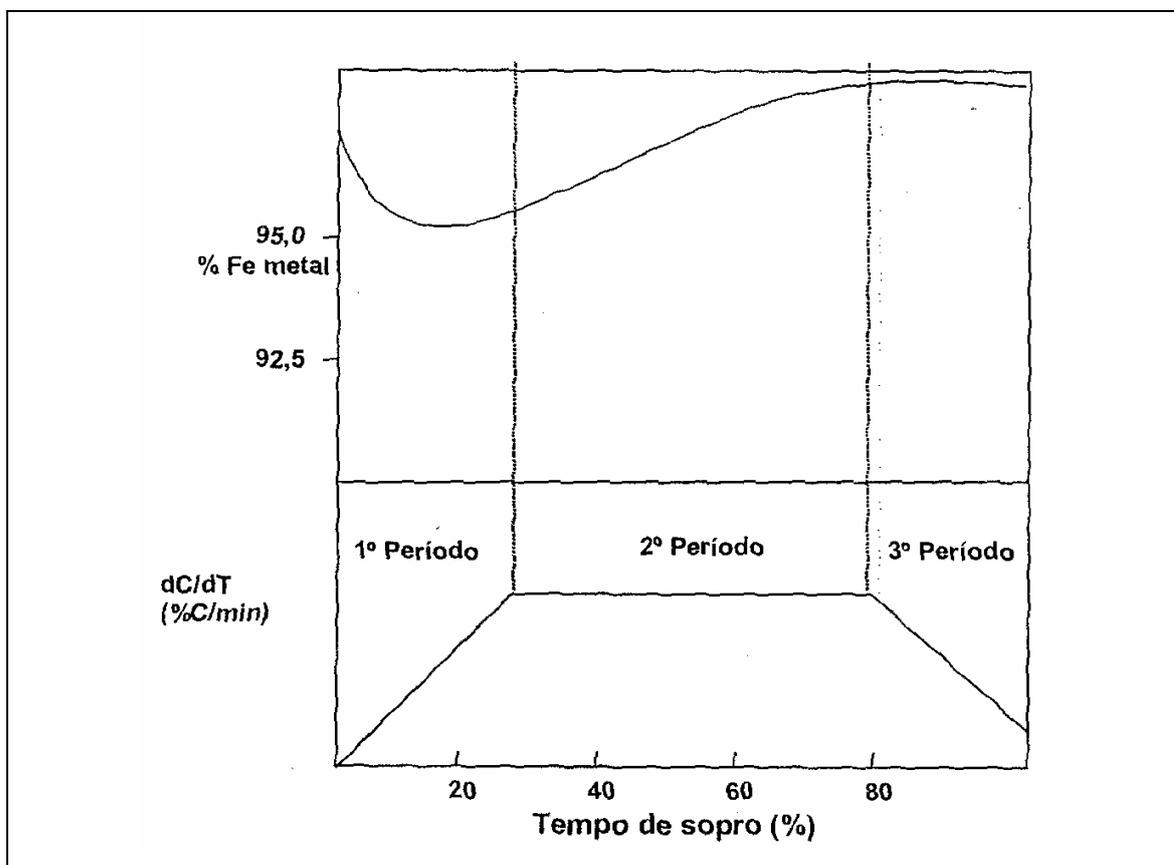


Figura 3.24: Evolução do teor de Fe no metal ao longo do sopro (FARIA 2004).

A oxidação acentuada do ferro na etapa inicial do sopro é importante para a formação de uma escória reativa, capaz de acelerar a dissolução da cal, com efeitos benéficos para a desfosforação. Os principais procedimentos para esta etapa são:

- Prática de sopro macio
- Adição de fontes de  $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Permanência no convertedor de escória de corridas anteriores

A oxidação do ferro no estágio final de sopro deve ser minimizada, para se ter melhor rendimento metálico e melhor rendimento de adições de ligas na panela, principalmente o alumínio. Deve-se promover sopro duro (lança baixa), em especial para aços acalmados ao alumínio e com baixo teor de carbono.

### 3.13- Condições de sopro

As condições de sopro no refino LD estão relacionadas à vazão de oxigênio disponível, ao projeto do bocal de lança de oxigênio e à relação de penetração do jato de oxigênio no banho ( $L/L_0$ ), conforme figura 3.25.

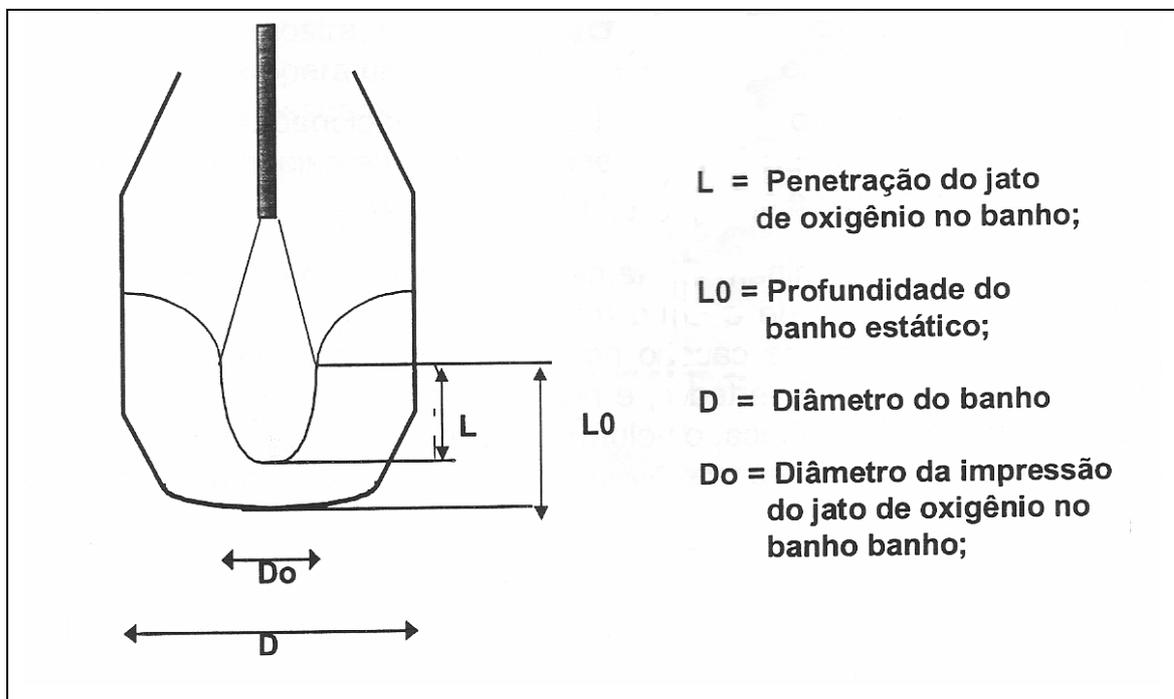


Figura 3.25: Deformação do banho formada pelo impacto do jato (ROMÃO, 2002).

Estas condições determinam diretamente a distância banho-lança e tem influência na formação de escória (dissolução da cal), na incidência de projeção, na formação de cascão na lança, no sistema de captação de gases e na boca do convertedor, e no rendimento metálico. No caso da formação do cascão de boca, o volume específico dos convertedores tem grande influência.

A vazão de oxigênio é uma característica de projeto da aciaria, definida juntamente com a capacidade do sistema de captação e limpeza dos gases, e do fornecimento de oxigênio.

Os parâmetros significativos para o projeto do bocal de lança são os números de furos, o ângulo de sopro dos furos em relação ao eixo longitudinal da lança e o diâmetro crítico do bocal.

Para definição do número de furos leva-se em consideração a capacidade dos convertedores. Como regra geral, para maiores capacidades, maior a movimentação do banho.

Tem-se buscado hoje trabalhar com vazões de oxigênio mais elevadas, com redução expressiva no tempo de sopro e sem prejuízo da fusão total da sucata, em tempo hábil. Por isto, têm sido feitas mudanças no projeto dos bicos de lança. Especialistas têm projetado bocais especiais, com maior número de furos, com dois ângulos radiais adicionais, para aumento da movimentação do banho, sem falar no jato coerente.

Com relação a altura do banho estático,  $L_0$ , a geometria do forno têm grande influência. Fornos sem o cone inferior ou com menor inclinação, apresentam alturas mais baixas do banho metálico. Nestas situações, a lança de oxigênio tem que trabalhar mais alta em relação ao nível do banho metálico, para manter a mesma relação de penetração do jato, o que pode ser um complicador quando o revestimento está mais desgastado.

Para profundidade de penetração do jato de oxigênio inferiores a 805 do banho o sopro tende a ser macio e é importante, até cerca de 25 a 30% do tempo total previsto, para auxiliar numa rápida formação de escória, favorecendo as reações. No entanto, o sopro

macio por um longo período leva a um aumento excessivo da reação  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ , podendo resultar em projeções de aço e escória.

Já o sopro duro ( $L/L_0$  superior a 0,9) é importante na etapa final de sopro para reduzir o nível de oxidação do banho. Se adotado desde o início de sopro, propicia uma formação de escória com baixo nível de oxidação, a chamada escória seca, com baixo nível de FeO, o que acarreta numa dissolução incompleta de cal, em prejuízo das reações de refino. Além disso, o sopro duro tem um peso importante na formação de cascão na lança e sistema de captação de gases, devido a maior ejeção de partículas metálicas para fora da emulsão metal-gás-escória.

A prática de altura de lança mais aconselhável é a que varia a relação de penetração ao longo do período de sopro. Esta prática garante boa formação de escória no início, promove agitação adequada para o período de descarburização máxima e controla a oxidação do ferro e manganês na etapa final.

A incidência de cascão na lança e no sistema de captação de gases está ligada a fatores operacionais, interdependentes, como a viscosidade e o volume de escória (%Si), altura da lança, pressão do sopro, entre outros. O cascão é formado preferencialmente na fase inicial do sopro, em função, principalmente, do baixo volume apresentado neste instante. O bico de lança deve estar submerso na emulsão metal-gás-escória, ao longo de todo o sopro, conforme esquema da figura 3.26.

O volume de escória mínimo para um bom desempenho do processo é da ordem de 80 a 90 kg/t, o que corresponde a um teor de silício do gusa de 0,35%. Valores inferiores a este, indicam a necessidade de correção com a fonte qualquer de silício como FeSi ou SiC. A prática de deixar parte da escória de corridas anteriores é bem apropriada. Algumas usinas utilizam a escória LD granulada, via silo, o que permita uma redução significativa no consumo de fluorita ou similares, além de reduzir a formação de cascão, pois corrige também o volume de escória.

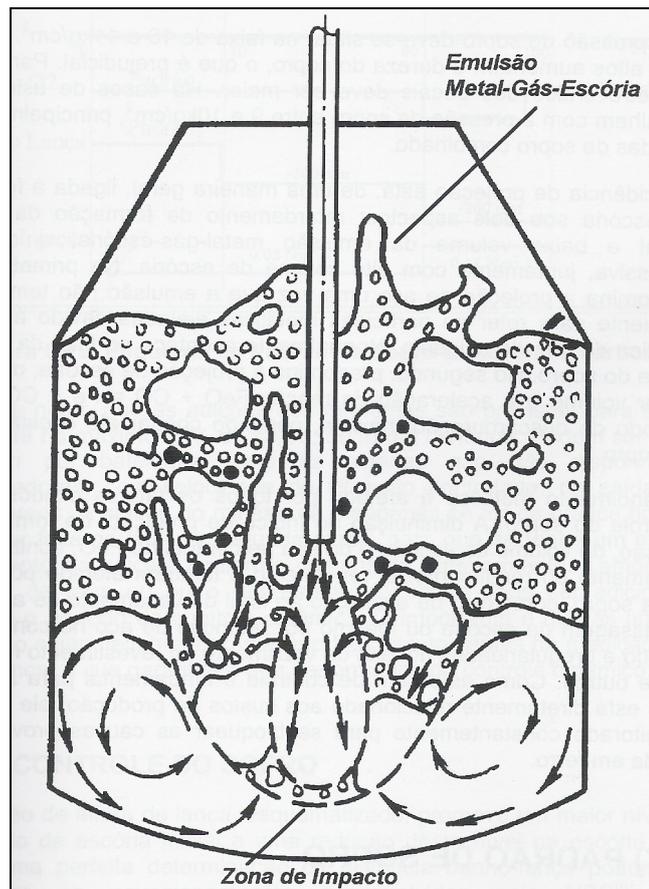


Figura 3.26: Esquema do posicionamento da lança de oxigênio durante o sopro em relação à emulsão metal-gás-escória (SCHOOP,1981).

Já a pressão do sopro deve situar na faixa de 10 a 11kg/cm<sup>2</sup>. Valores mais altos aumentam a dureza do sopro, o que é prejudicial. Para isto, o diâmetro crítico dos bocais deve ser maior. Há casos de usinas que trabalham com a pressão de sopro entre 9 a 10 kg/cm<sup>2</sup>, principalmente as dotadas de sopro combinado.

A incidência de projeção está, de uma maneira geral, ligada à formação de escória sob dois aspectos: retardamento da formação da escória inicial e baixo volume da emulsão metal-gás-escória, e oxidação excessiva, juntamente com o alto volume de escória. No primeiro caso, predomina a projeção de aço uma vez que a emulsão não tem volume suficiente para reter as partículas metálicas ejetadas devido à energia cinética do jato de oxigênio. Normalmente acontece no final da primeira etapa de sopro. No segundo, predomina a projeção de escória, devido ao maior volume e à aceleração da reação FeO

+ CO = Fe + CO<sub>2</sub> , já no período de descarburização máxima, podendo chegar até p estágio final de sopro.

O rendimento metálico é afetado por todos os fatores citados para o controle de sopro. A diminuição do índice de projeção, da formação de cascão, do volume de escória e do seu percentual de FeO, contribui para o aumento do rendimento. O rendimento é também afetado por fatores extra sopro, tais como, erro de avaliação ao final do vazamento de aço sobre a passagem de escória ou mesmo por retenção de aço no convertedor, devido a irregularidades no leito de vazamento do revestimento refratário, entre outros. Como este item de controle é fundamental para a aciaria, pois está diretamente relacionado aos custos de produção, ele deve ser monitorada constantemente para se bloquear a causa provável de perda de ferro.

### **3.14-Padrão de Sopro**

Segundo Mundim(1991), as adições de fundentes são previstas para serem feitas até no máximo 50% do sopro, de forma contínua. Podem ser feitas também por bateladas, para aciarias que não dispõem alimentadores, com velocidade de vibração controlada, na saída dos silos. A adição de minério de manganês se for prática normal, deve ser feita no final da segunda etapa, para que se tenha um melhor rendimento da adição. Também o minério de ferro ou outro refrigerante do banho pode ser adicionado durante o período do controle dinâmico.

### **3.15-Controle do Sopro**

Segundo Mudim (1991), o padrão de altura de lança promove um maior nível de oxidação da escória inicial e uma redução deste nível na escória final. Para uma determinação da distância banho-lança pode ser utilizado os equacionamentos, já mostrados anteriormente, desenvolvidos pela Nippon Steel. Estas equações relacionam a vazão de oxigênio de trabalho com a pressão de sopro, diâmetro equivalente dos furos do bocal, ângulo dos furos e altura do banho estático, para determinação da profundidade do jato de oxigênio no banho:

$$deq = nf * \left(\frac{dt}{Kn}\right) \quad (3.7)$$

$$Lho = 63 * \left(\frac{Q}{dt}\right)^{2/3} \quad (3.6)$$

$$L = Lho * EXP\left(-0,78 * \frac{h}{Lho}\right) \quad (3.5)$$

dc: Diâmetro crítico do furo

n: número de furos

Lho: Penetração do jato para altura da lança igual a zero

Q: Vazão de oxigênio

deq: diâmetro equivalente

K: fator de correção dado em função do ângulo de inclinação e n° furos

h: distância banho-lança

Valores de k, dados em função do ângulo de inclinação dos bocais para bicos de três e quatro furos, são mostrados na figura 3.27.

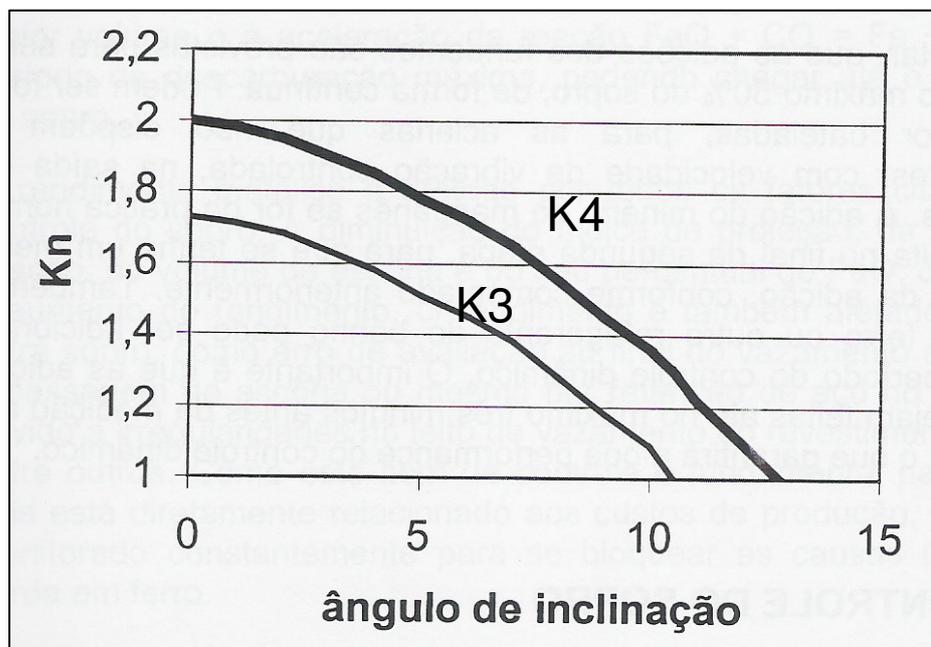


Figura 3.27: Valores de K para projeto de bico de lança n= 3 e quatro furos (SCHOOP, 1981).

É importante que a altura do banho estático ( $L_0$ ) seja bem definida. Este valor pode ser previsto, com boa precisão, a partir do relacionamento obtido entre as medições de sola e nível de banho, feitas durante a campanha do revestimento refratário.

A quantidade de escorificantes necessárias ao processo deve ser otimizada. Material em excesso, além de afetar o custo de produção pode introduzir perturbações no controle de sopro. O cálculo deve ser feito em função do teor de Si e P do gusa líquido, dos teores de CFS e PFS visados. Segundo Faria (1993), para um teor de Si do gusa de 0,40%, a adição de cal e dolomita calcinada gira em torno de 45 kg/t. Para níveis de Si inferiores esta adição cresce, a fim de compensar o volume de escória. A adição de fluorita varia em função de condições operacionais de cada usina, como qualidade de sucata, volume de escória, entre outros, podendo ser de 0 a 10% do peso de CaO adicionado. O minério de ferro é utilizado para o fechamento do balanço térmico.

Juntamente com o cálculo dos fundentes, efetuados no início do sopro por uma estação de cálculos, é feita a determinação do volume de oxigênio para a corrida e do material refrigerante/combustível sólido para o fechamento do balanço térmico.

## 4. METODOLOGIA

Uma operação de sopragem que promova os melhores resultados de fim de sopro é o principal objetivo. As condições que se oferecem para este fim devem atender o mínimo necessário para o bom êxito operacional. Quando isto não acontece, devem-se empregar meios alternativos que possam minimizar os efeitos colaterais causados por alguma mudança operacional.

O número de variáveis metalúrgicas que tem influência nos resultados do processo de refino do gusa em convertedores LD é muito grande. Algumas vezes é difícil identificar qual a variável foi a causadora de um resultado insatisfatório. Em alguns casos, certos parâmetros operacionais muito importantes não podem sofrer alterações, pois são inerentes à configuração estabelecida pela empresa.

Conforme foi mostrado na revisão bibliográfica, o trabalho de adequação do processo para se conseguir operar a aciaria com a lança de quatro furos está sendo focado nos aspectos que envolvem o processo de sopro, tais como: tempo de sopro, rendimento metálico, FeO na escória, variabilidade do fósforo fim de sopro, temperatura fim de sopro, consumo de fluoreto.

Diante dessa realidade, o que se fez é realizar é um projeto de experimento com as seguintes fases:

### 1 – Etapa Teórica

- Desenvolvimento dos padrões de sopro para lança de quatro furos.
- Implementação dos padrões da lança de 4 furos no modelo de sopro

### 2 – Etapa experimental:

- realização da parte prática com o objetivo de validar os padrões de sopro desenvolvidos para lança de quatro furos.

## **4.1 – Etapa Teórica**

Os padrões de sopro desenvolvidos para lança de quatro furos foram calculados levando em consideração os padrões existentes para lança de três furos, onde foi recalculada a altura de lança, vazão de oxigênio e tempo de adições.

Para implementação dos padrões de sopro no modelo, foram levadas em consideração as mesmas regras para mudança de padrão para lança de três furos, onde foram inseridos estes novos padrões na tela de padrão de sopro e feita uma tabela de equivalência de padrões.

O cálculo dos padrões para lança de quatro furos e a implementação dos padrões no modelo de sopro estão nos anexo 1 e 2.

## **4.2 – Etapa Experimental**

A etapa experimental foi dividida em duas fases:

Fase 1: realização de experimentos exploratórios, onde corridas experimentais foram realizadas buscando um maior conhecimento técnico visando uma melhor determinação das variáveis que influenciavam o processo.

Fase 2: realização de um planejamento experimental com o objetivo de realizar os testes finais.

Para se quantificar e priorizar os fatores causais foi utilizada uma ferramenta que vem se mostrando muito útil na melhoria dos resultados dos processos que é o Planejamento de Experimentos.

Na metodologia de planejamento de experimentos são utilizados alguns conceitos Werkema (2000):

- 1 – Variável resposta: são as variáveis por meio das quais são avaliados os resultados do experimento.
- 2 – Fator: variáveis que são deliberadamente alteradas em um experimento, com o objetivo de avaliar o efeito que elas exercem sobre as variáveis respostas.
- 3 – Níveis de um fator: representam as possíveis condições que um fator pode assumir em um experimento.
- 4 – Variáveis de ruído: são variáveis conhecidas que afetam as variáveis respostas de um experimento, mas que na prática não há como controlá-las ou não há interesse em tratá-las como fatores.

Após a determinação dos fatores e seus respectivos níveis a verificação dos resultados foi realizada utilizando métodos estatísticos onde os resultados das corridas experimentais com a lança de quatro furos foram comparados com corridas realizadas na rotina com a lança de três furos. A seleção das corridas da rotina foi obtida do banco de dados da aciaria referente aos meses de maio 2005 a fevereiro 2006.

Para comparação dos resultados foi realizado um filtro nos dados visando obter as características de processo (teor de Si do gusa, peso do gusa, peso de sucata) bem próximas das quais foram realizadas as corridas experimentais. Ou seja, através desse filtro foi possível comparar duas amostras de dados semelhantes com e sem prática experimental. A comparação estatística foi necessária devido à dificuldade na repetibilidade dos experimentos, pois as variações naturais do processo (composição química e temperatura do gusa, faixa de percentual de carbono fim de sopro e ruídos do processo) entre os experimentos não garantem essa repetibilidade com precisão.

#### **4.3-Plano de experimento**

Para a fase 2 foi proposto um planejamento experimental levando em consideração à lança atual de três furos e a lança de quatro furos, onde foi adotada a metodologia para um experimento levando em consideração os fatores, níveis de fatores, variáveis ruído e variáveis resposta.

Estes procedimentos foram adotados para Carbono fim de sopro visado 0,03%, 0,04%, 0,05% e 0,06%.

- Fator: Foi considerado com fator o tipo de lança utilizado na fabricação do aço
- Níveis de um fator: Número de furos da lança três ou quatro furos
- Variáveis ruídos: Foi considerado como variáveis ruído o % Si do gusa, peso do gusa enornado, Mise au mille (relação gusa/ sucata enornado). Para determinação dos limites (faixas) a serem utilizados na análise de resultados para cada variável ruído foram extraídos os outliers utilizando o gráfico Box-Plot no software MINITAB.
- Variáveis respostas: Foi considerado como variáveis resposta o tempo de sopro, rendimento metálico, FeO da escória, temperatura fim de sopro.

As variáveis respostas foram medidas pelos seguintes equipamentos:

- 1 – Metalanalyser Ótico (composição química do aço);
- 2 – Raio-X Sequencial (escória fim de sopro);
- 3 – Multi-labCelox (Temperatura fim de sopro);
- 4 – SAA – Sistema de automação da Aciaria (tempo de sopro e consumo de fluorita)

Para verificação dos resultados foi realizado o teste de normalidade para realização de testes sobre a média (t\_student e análise de variância) das variáveis respostas.

## 5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído

Para determinar os limites de trabalho para as variáveis ruído (%Si gusa, peso do gusa e relação gusa/sucata (Mise au mlle)), foi utilizado o gráfico Boxplot como alternativa para excluir os *outliers* (dados atípicos) do banco de dados.

### 5.2-Análise das variáveis respostas

Para análise das variáveis respostas foram realizados testes de hipóteses com objetivo de avaliar se duas amostras possuem as mesmas características. Os testes utilizados foram o teste t para o caso dos dados que apresentam distribuição próxima da normal e o teste Kruskal Wallis para os dados que não apresentam distribuição próxima da normal. O software estatístico utilizado para as análises foi o MINITAB, versão 14.1.

O teste t é realizado sobre as médias para comparar dois conjuntos de amostras que seguem uma distribuição próxima da normal.

A avaliação das médias para esse método estatístico se baseia nas seguintes hipóteses:

Hipótese  $H_0$ :  $\mu_1 = \mu_2$

Hipótese  $H_1$ :  $\mu_1 \neq \mu_2$

$\mu_1$ : média obtida utilizando-se lança 3 furos

$\mu_2$ : média obtida utilizando-se lança 4 furos

O principal critério para decisão sobre qual hipótese recusar é feito sobre o valor de *P-value* (menor valor de alfa, ou nível de significância, para o qual rejeita-se a hipótese  $H_0$ ). Se *P-value* for maior que 0,05 (ou 5%) pode-se dizer que há evidências de que não há diferença entre as médias, ou seja, não rejeitamos a hipótese  $H_0$ .

Para avaliação do desvio padrão foi utilizado o teste para igualdade de duas variâncias.

A avaliação do desvio para esse método estatístico se baseia no teste das seguintes hipóteses:

Hipótese Ho:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

Hipótese H1:  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

$\sigma_1^2$ : variância obtida utilizando-se lança 3 furos

$\sigma_2^2$ : variância obtida utilizando-se lança 4 furos

O principal critério para decisão sobre qual hipótese recusar é feito sobre o valor de *P-value* (menor valor de alfa, ou nível de significância, para o qual rejeita-se a hipótese  $H_0$ ). Se *P-value* for maior que 0,05 (ou 5%) pode-se dizer que há evidências de que não há diferença entre as variâncias, ou seja, não rejeitamos a hipótese  $H_0$ .

O teste Kruskal Wallis é um teste não-paramétrico que independe da distribuição normal e é baseado nas medianas das populações.

A avaliação das medianas para esse método estatístico se baseia nas seguintes hipóteses:

Hipótese Ho:  $\eta_1 = \eta_2$

Hipótese H1:  $\eta_1 \neq \eta_2$

$\eta_1$ : mediana obtida utilizando-se lança 3 furos

$\eta_2$ : média obtida utilizando-se lança 4 furos

Obs.: O teste de Kruskall Wallis pode ser utilizado para comparar mais de duas medianas de populações diferentes.

O principal critério para decisão sobre qual hipótese recusar é feito sobre o valor de *P-value* (menor valor de alfa, ou nível de significância, para o qual rejeita-se a hipótese  $H_0$ ). Se *P-value* for maior que 0,05 (ou 5%) pode-se dizer que há evidências de que não há diferença entre as médias, ou seja, não rejeitamos a hipótese  $H_0$ .

Uma suposição para este é de que as amostras de diferentes populações são amostras aleatórias e independentes provenientes de distribuições contínuas, com as distribuições tendo a mesma forma.

### 5.3. – Análise dos resultados

Levando em consideração o planejamento experimental foram utilizadas 801 corridas para análise de resultados, sendo 470 com a lança de três furos e 331 corridas com a lança de quatro furos analisadas de acordo com o carbono fim de sopro visado.

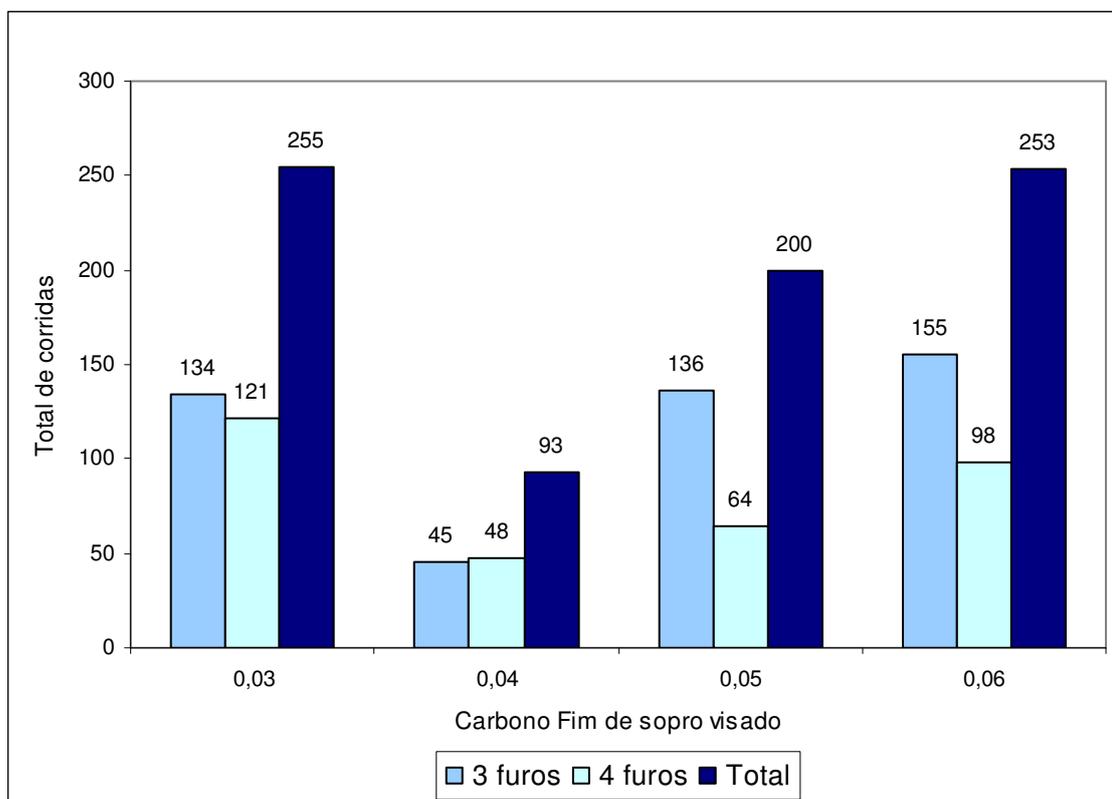


Figura 5.1: Distribuição das corridas analisadas no experimento

### 5.3.1- Carbono fim de sopro visado 0,030% (300 ppm)

#### 5.3.1.1- Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído

Para determinar dos limites de trabalho para o %Si do gusa, peso do gusa e Mise au Mille, foi utilizado o gráfico Boxplot do MINITAB, onde as faixas estabelecidas foram:

Tabela V.1: Limites de trabalho das variáveis ruído

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Desvpad.</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Si_gusa (%)	0,36	0,077	0,202	0,494
Peso do gusa (ton.)	96,37	4,331	86	107,8
Mise au mille (kg/t)	884,81	27,02	817	947

Para análise, após o filtro das variáveis ruído, foram utilizadas 255 corridas sendo 121 corridas utilizando a lança de quatro furos e 134 corridas utilizando a lança de três furos, onde as seguintes variáveis respostas foram analisadas:

#### 5.3.1.2-Análise das variáveis respostas

Para análise das variáveis respostas foi utilizado o teste de hipótese com objetivo de comparar se duas amostras possuem as mesmas características quanto a média e variância, onde as seguintes variáveis foram analisadas:

- **Tempo de sopro:**

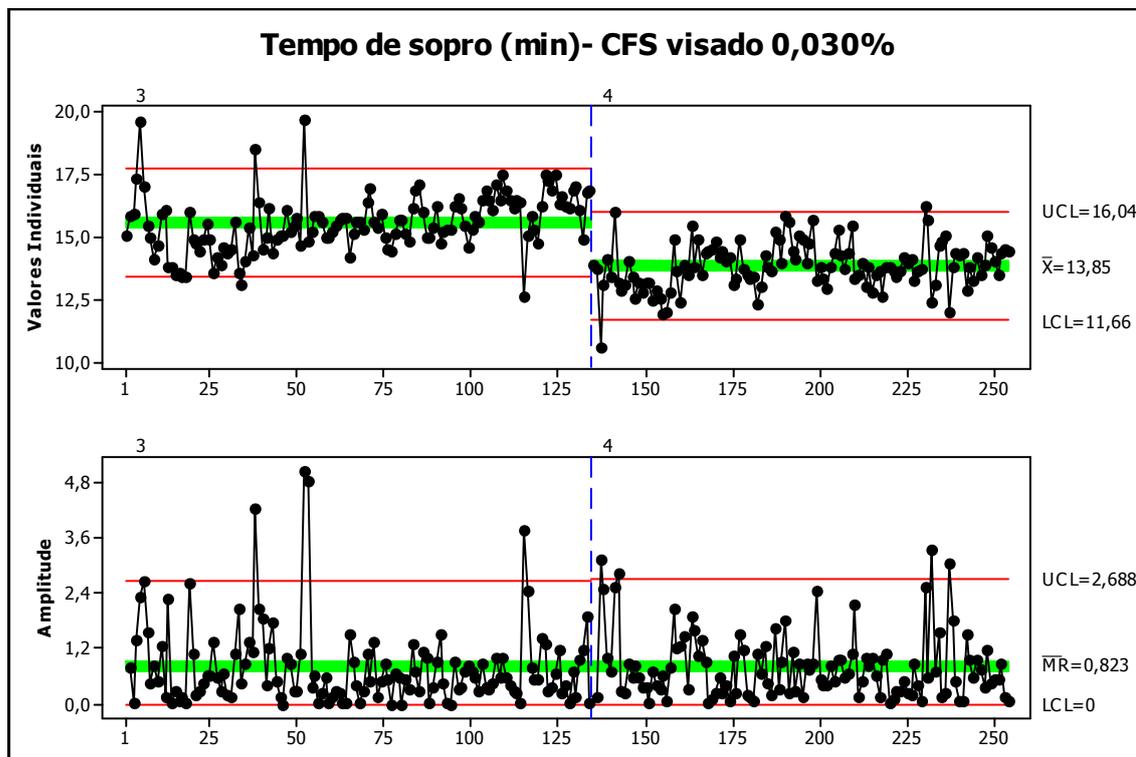


Figura 5.2: Gráfico IMR para tempo de sopra (min.) para carbono visado 0,030%

**Teste T:**

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	134	15,56	1,15	0,10
4	121	13,89	1,01	0,092

Difference = mu (3) - mu (4)  
 Estimate for difference: 1,67118  
 95% CI for difference: (1,40424; 1,93812)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 12,33  
**P-Value = 0,000** DF = 252

**-Teste Variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	134	1,01450	1,15438	1,33697
4	121	0,88176	1,00977	1,17924

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 1,31; **p-value = 0,136**

Analisando o Teste t, como o valor de P-value <0,05, pode-se afirmar que, ao nível de significância de 5% (alfa = 0,05), há evidências de diferença entre as médias e portanto

que com a lança de quatro furos houve uma redução no tempo de sopro. Para o desvio padrão como P-Value > 0,05, pode-se afirmar que não evidências estatísticas de diferença entre os desvios padrão

### - Rendimento Metálico

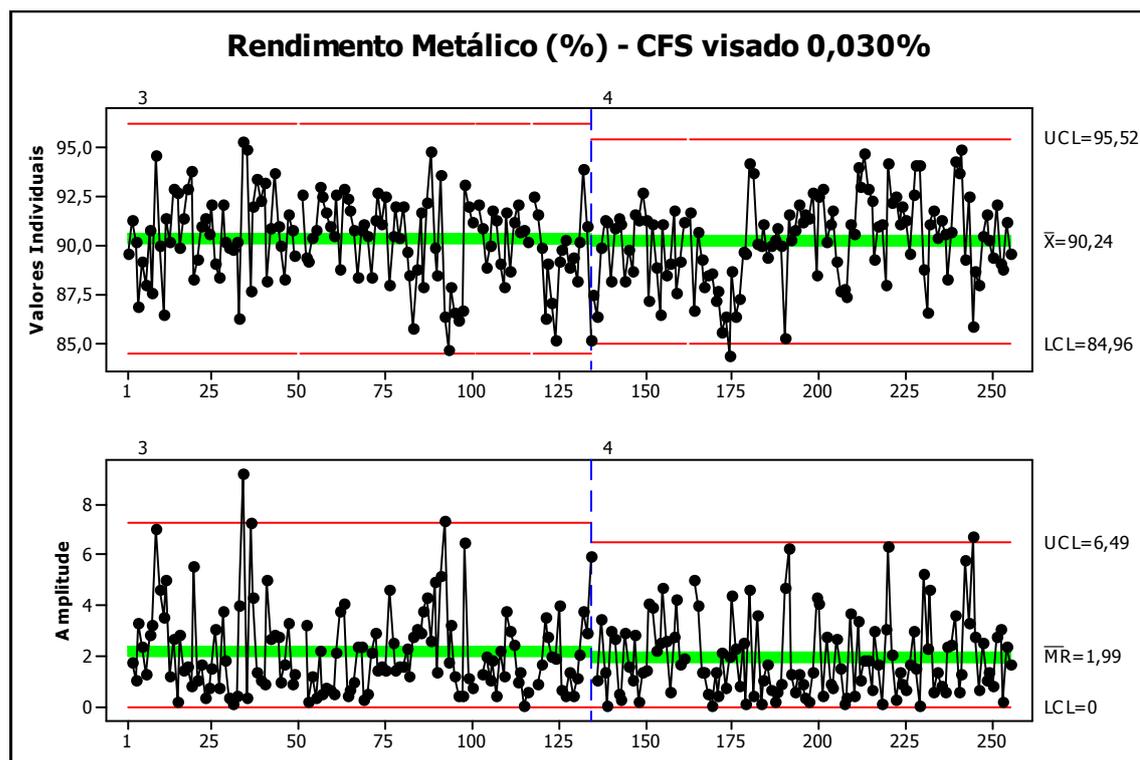


Figura 5.3: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,030%

### - Teste T:

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	131	90,35	2,21	0,19
4	124	90,24	2,24	0,20

Difference =  $\mu(3) - \mu(4)$   
 Estimate for difference: 0,108728  
 95% CI for difference: (-0,445671; 0,663126)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,39  
**P-Value = 0,700** DF = 246

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	131	1,94090	2,21159	2,56603
4	124	1,95675	2,24201	2,62013

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 0,97; **p-value = 0,877**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, o rendimento metálico com a lança de quatro furos apresentou o mesmo resultado da lança de três furos. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

### - FeO da Escória LD

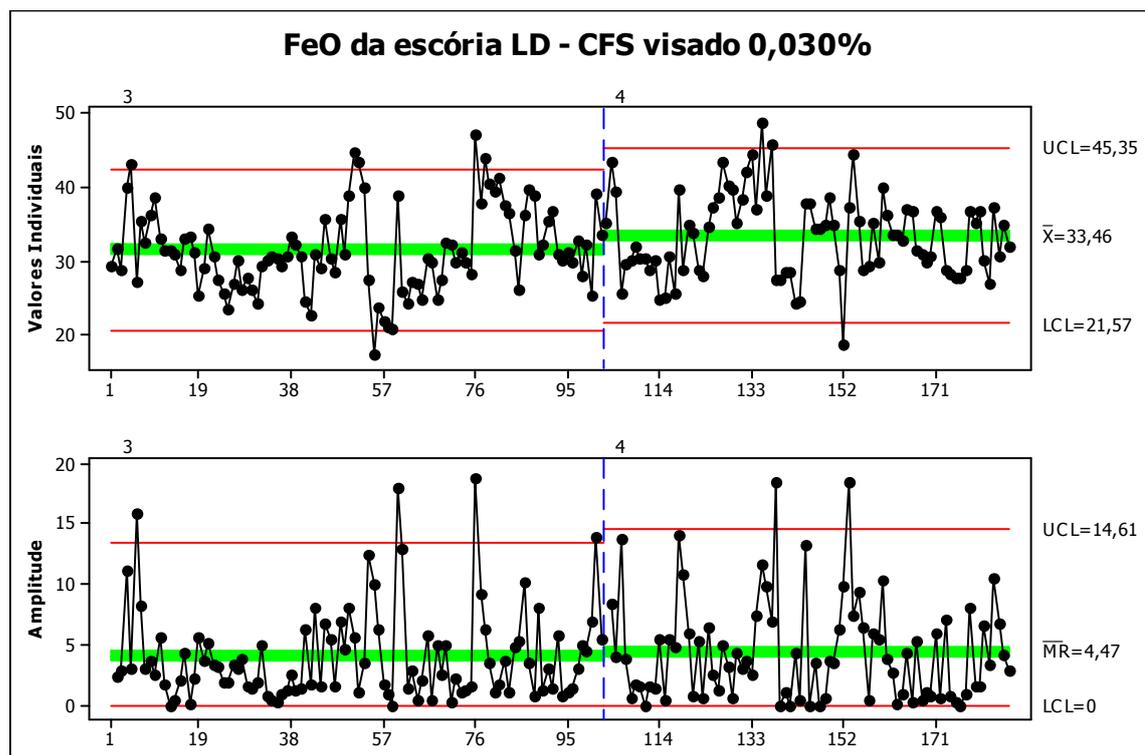


Figura 5.4: Gráfico IMR para FeO da escória LD para carbono visado 0,030%

### - Kruskal - Wallis:

LANÇA	N	Median	Ave Rank	Z
3	102	30,81	85,8	-2,16
4	84	33,85	102,9	2,16
Overall	186		93,5	
H = 4,66 DF = 1 P = 0,031				
H = 4,66 DF = 1 P = 0,031 (adjusted for ties)				

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	102	4,92129	5,70016	6,75798
4	84	4,80605	5,64527	6,82200
Levene's Test (any continuous distribution)				
Test statistic = 0,49; p-value = 0,484				

Analisando o Kruskal -Wallis, como o valor de P-value <0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos houve um aumento no teor de FeO. Para o desvio padrão como P-Value > 0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que o desvios padrões são iguais.

**- Temperatura fim de sopra**

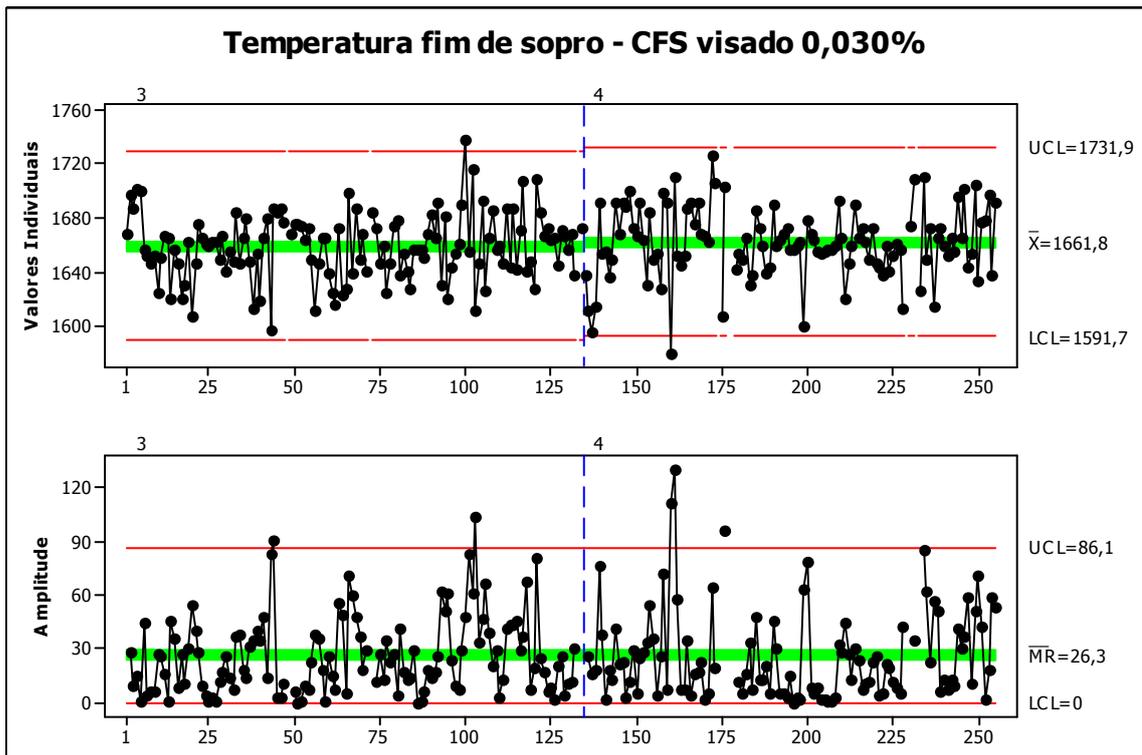


Figura 5.5: Gráfico IMR para temperatura fim de sopro (°C) para carbono visado 0,030%

**- Teste T:**

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	131	1659,1	24,4	2,1
4	116	1661,8	26,4	2,5

Difference = mu (3) - mu (4)  
 Estimate for difference: -2,66333  
 95% CI for difference: (-9,06354; 3,73688)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0,82  
**P-Value = 0,413** DF = 235

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	131	21,3742	24,3552	28,2584
4	116	23,0238	26,4383	30,9865

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 0,85; **p-value = 0,363**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos a média da temperatura fim de sopro apresentou a mesma. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

### 5.3.2- Carbono fim de sopro visado 0,040% ( 400 ppm)

#### 5.3.2.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído

Para determinar dos limites de trabalho para o %Si do gusa, peso do gusa e Mise au Mille, foi utilizado o gráfico Box-plot do MINITAB, onde as faixas estabelecidas foram:

Tabela V.2: Limites de trabalho das variáveis ruído

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>DesvPad.</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Si_gusa(%)	0,29	0,07	0,16	0,46
Peso do gusa (ton.)	97,09	4,88	84,5	108,6
Mise au mille (kg/t)	881,89	31,18	805	953

Para análise, após o filtro das variáveis ruído, foram utilizadas 93 corridas sendo 48 corridas utilizando a lança de quatro furos e 45 corridas utilizando a lança de três furos, onde as seguintes variáveis respostas foram analisadas:

#### 5.3.2.2-Análise das variáveis respostas

Para análise das variáveis respostas foi utilizado o teste de hipótese com objetivo de comparar se duas amostras possuem as mesmas características quanto a média e variância. As seguintes variáveis foram analisadas:

**- Tempo de sopro:**

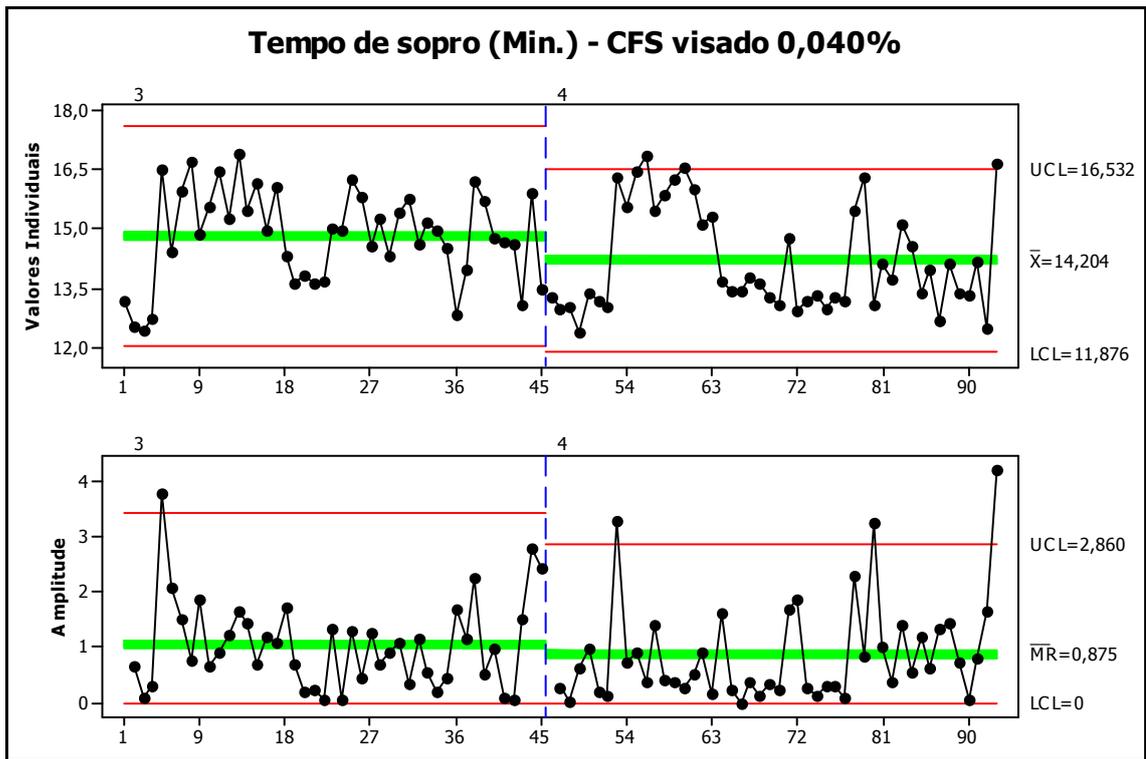


Figura 5.6: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,040%

**Kruskal-Wallis Test:**

Kruskal-Wallis Test on TSOPRO MIN )

LANÇA	N	Median	Ave Rank	Z
3	45	14,97	53,9	2,37
4	48	13,66	40,6	-2,37
Overall	93		47,0	

H = 5,62 DF = 1 P = 0,018  
 H = 5,63 DF = 1 **P = 0,018** (adjusted for ties)

**-Teste Variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	45	0,95330	1,18203	1,54673
4	48	1,06809	1,31603	1,70532

Levene's Test (any continuous distribution)  
 Test statistic = 0,39; **p-value = 0,536**

Como as distribuições dos dados de tempo de sopro não apresentaram distribuição normal, foi utilizado para análise o teste Kruskal Wallis, como o valor de P-value <0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos houve uma redução no tempo de sopro. Para o desvio padrão como P-Value > 0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que os desvios padrões são iguais.

### - Rendimento Metálico

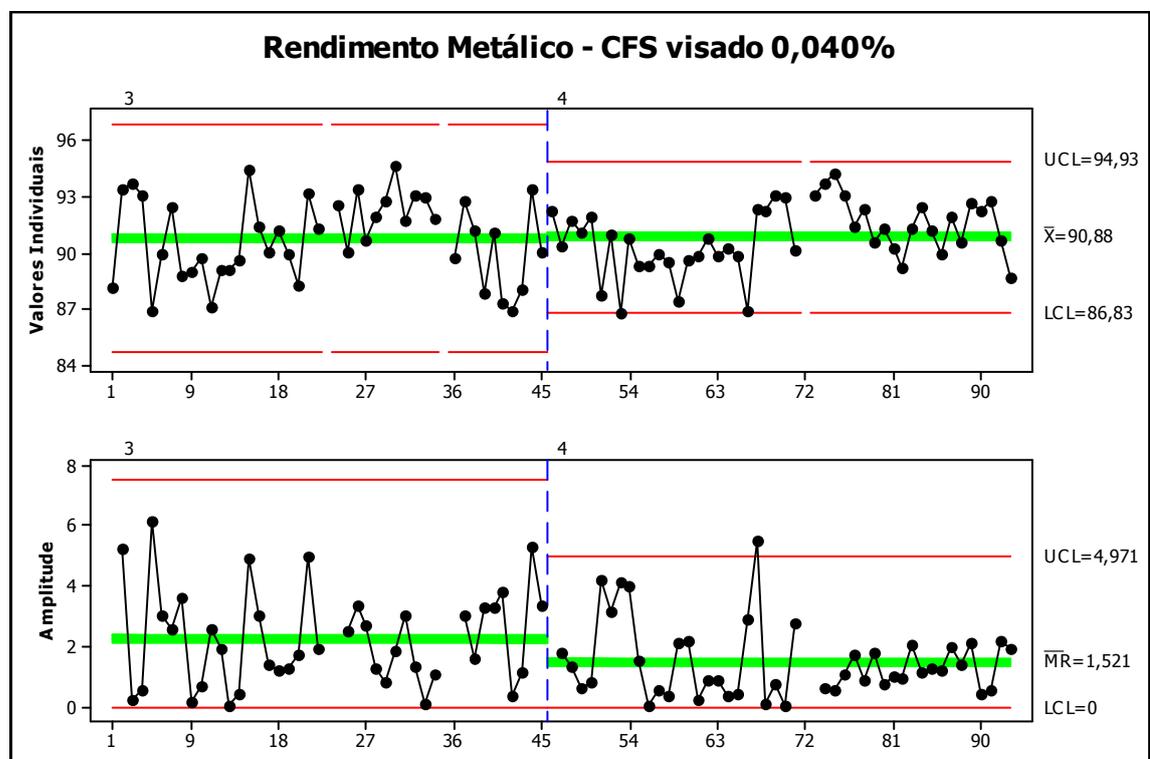


Figura 5.7: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,040%

### -Teste T:

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	43	90,80	2,19	0,33
4	47	90,88	1,74	0,25

Difference = mu (3) - mu (4)  
 Estimate for difference: -0,083528  
 95% CI for difference: (-0,918311; 0,751255)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0,20  
**P-Value = 0,843** DF = 80

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	43	1,75935	2,19141	2,88810
4	47	1,40779	1,73813	2,25938

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 1,59; **p-value = 0,126**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, o rendimento metálico com a lança de quatro furos apresentou o mesmo resultado da lança de três furos. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

#### - FeO da Escória LD

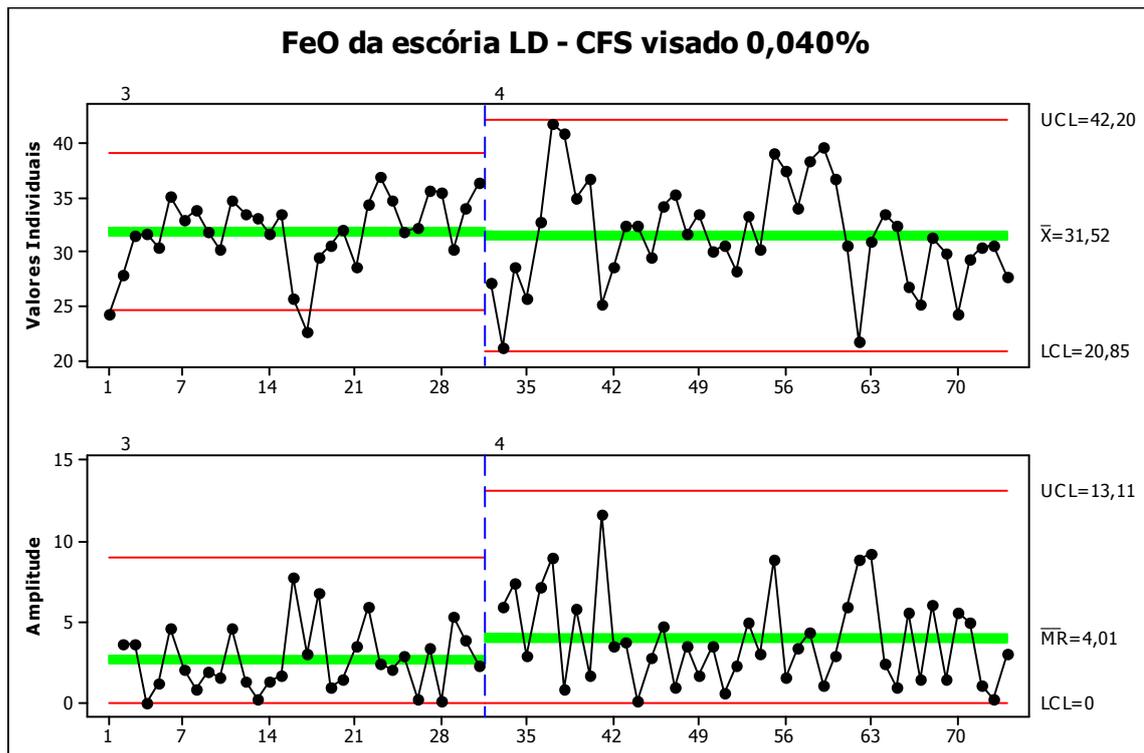


Figura 5.8: Gráfico IMR para FeO da escória para carbono visado 0,040%

#### - Teste T:

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	31	31,87	3,41	0,61
4	43	31,52	4,83	0,74

Difference = mu (3) - mu (4)

Estimate for difference: 0,347052

95% CI for difference: (-1,563330; 2,257433)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,36

**P-Value = 0,718** DF = 71

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	31	2,64407	3,41235	4,76795
4	43	3,87696	4,82907	6,36432

F-Test (normal distribution)

Test statistic = 0,50; **p-value = 0,049**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais,. Para o desvio padrão como P-Value = 0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que o desvios padrões são iguais.

### - Temperatura fim de sopro

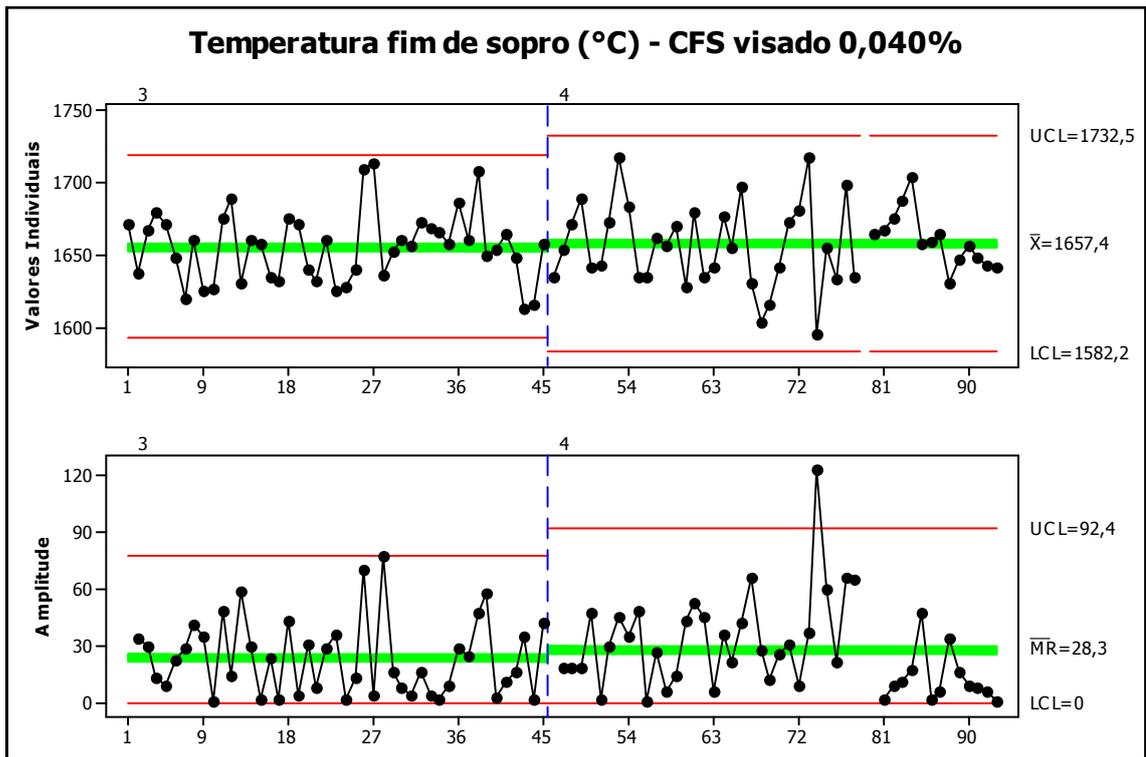


Figura 5.9: Gráfico IMR temperatura fim de sopro (°C) para carbono visado 0,040%

**- Teste T:**

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	45	1655,5	24,3	3,6
4	47	1657,4	27,2	4,0

Difference = mu (3) - mu (4)  
 Estimate for difference: -1,82837  
 95% CI for difference: (-12,51966; 8,86292)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0,34  
**P-Value = 0,735** DF = 89

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	45	19,6279	24,3372	31,8462
4	47	22,0642	27,2416	35,4110

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 0,80; **p-value = 0,454**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos a média da temperatura fim de sopro apresentou a mesma. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

### 5.3.3- Carbono fim de sopro visado 0,050% (500 ppm)

#### 5.3.3.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído

Para determinar dos limites de trabalho para o %Si do gusa, peso do gusa e Mise au Mille, foi utilizado o gráfico Box-plot do MINITAB, onde as faixas estabelecidas foram:

Tabela V.3: Limites de trabalho das variáveis ruído.

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>DesvPad.</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Si_gusa(%)	0,33	0,096	0,15	0,59
Peso do gusa (ton.)	97,79	4,93	84,0	110,8
Mise au mille (kg/t)	880,55	29,82	801	953

Para análise, após o filtro das variáveis ruído, foram utilizadas 200 corridas sendo 64 corridas utilizando a lança de quatro furos e 136 corridas utilizando a lança de três furos, onde as seguintes variáveis respostas foram analisadas:

#### 5.3.3.2-Análise das variáveis respostas

Para análise das variáveis respostas foi utilizado o teste de hipótese com objetivo de comparar se duas amostras possuem as mesmas características quanto a média e variância. As seguintes variáveis foram analisadas:

**- Tempo de sopro:**

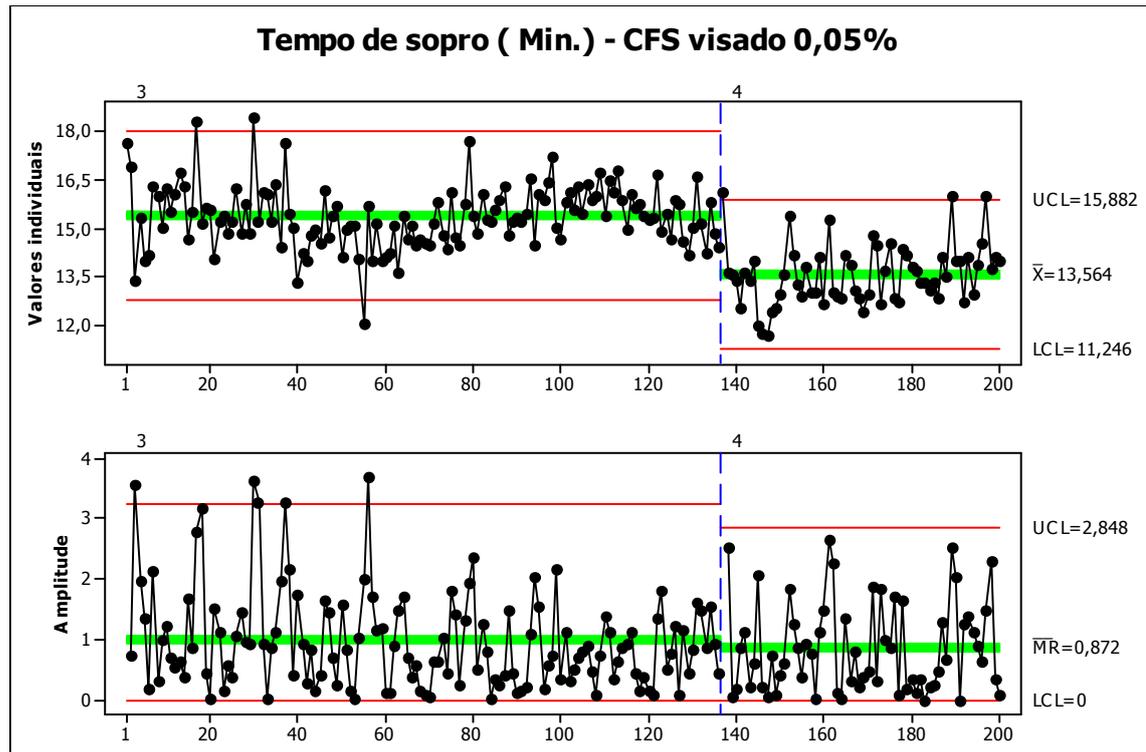


Figura 5.10: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,050%

**- Teste T:**

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	136	15,388	0,978	0,084
4	64	13,564	0,950	0,12

Difference =  $\mu$  (3) -  $\mu$  (4)  
 Estimate for difference: 1,82335  
 95% CI for difference: (1,53574; 2,11097)  
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 12,55

**P-Value = 0,000** DF = 126

**-Teste Variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	136	0,860380	0,978127	1,13152
4	64	0,790979	0,949549	1,18344

F-Test (normal distribution)

Test statistic = 1,06; **p-value = 0,805**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value  $< 0,05$ , pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos houve uma redução no tempo de sopro. Para o desvio padrão como P-Value  $> 0,05$ , pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que o desvios padrões são iguais.

#### - Rendimento Metálico

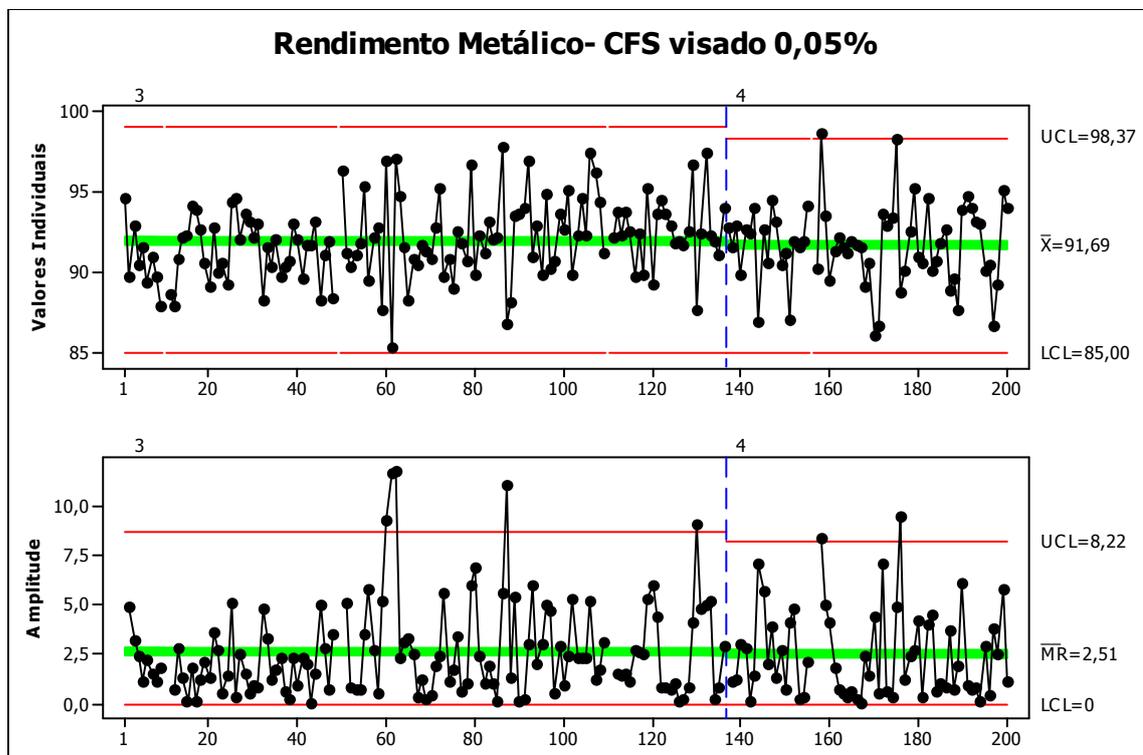


Figura 5.11: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,05%

#### - Teste T:

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	133	92,00	2,40	0,21
4	63	91,69	2,53	0,32

Difference = mu (3) - mu (4)

Estimate for difference: 0,311295

95% CI for difference: (-0,441836; 1,064426)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,82

**P-Value = 0,415** DF = 116

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	133	2,10900	2,40090	2,78231
4	63	2,10102	2,52560	3,15385

F-Test (normal distribution)

Test statistic = 0,90; **p-value = 0,622**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, o rendimento metálico com a lança de quatro furos apresentou o mesmo resultado da lança de três furos. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

### - FeO da Escória LD

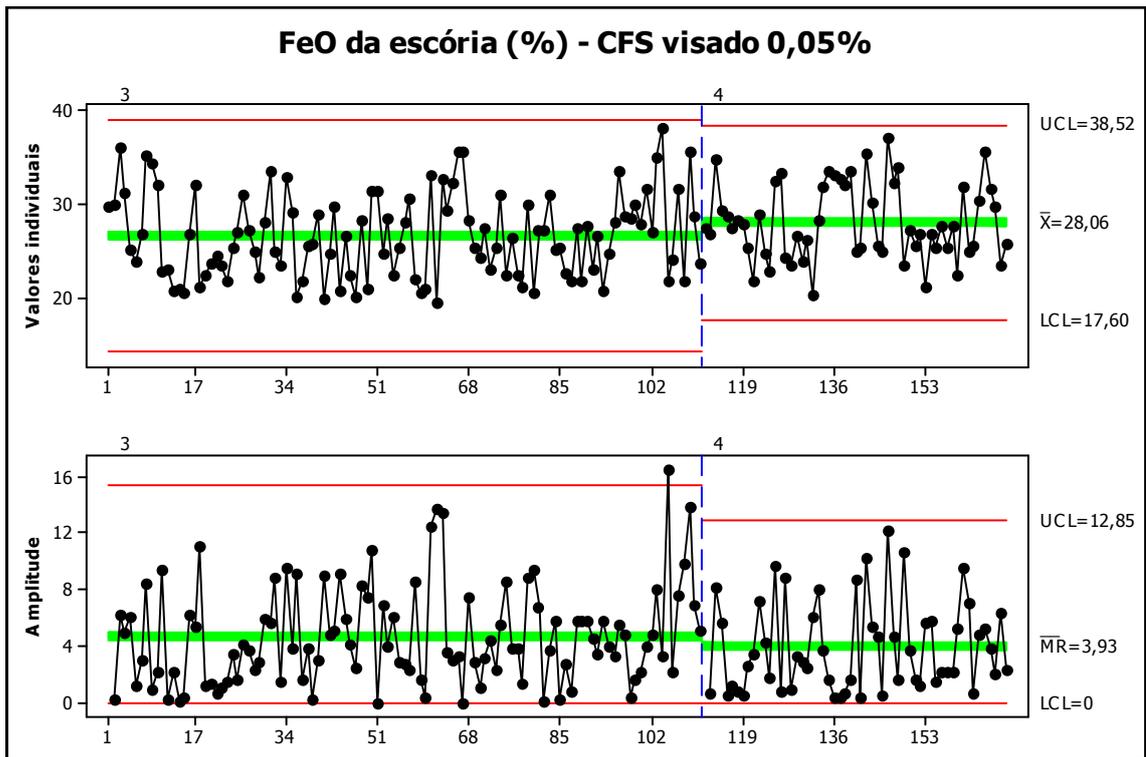


Figura 5.12: Gráfico IMR para FeO escória LD para carbono visado 0,050%

**- Kruskal-Wallis Test:**

Kruskal-Wallis Test on FEO					
LANÇA	N	Median	Ave Rank	Z	
3	111	26,37	78,8	-2,13	
4	57	27,45	95,7	2,13	
Overall	168		84,5		
H = 4,54 DF = 1 P = 0,033					
H = 4,54 DF = 1 <b>P = 0,033</b> (adjusted for ties)					

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	111	3,95661	4,55660	5,36102
4	57	3,37594	4,09384	5,17842
Levene's Test (any continuous distribution)				
Test statistic = 1,39; <b>p-value = 0,240</b>				

Como as distribuições dos dados de FeO da escória não apresentaram distribuição normal, foi utilizado para análise o teste Kruskal Wallis, como o valor de P-value <0,05,

pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos houve um aumento no FeO da escória. Para o desvio padrão como P-Value > 0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que os desvios padrões são iguais.

#### - Temperatura fim de sopro

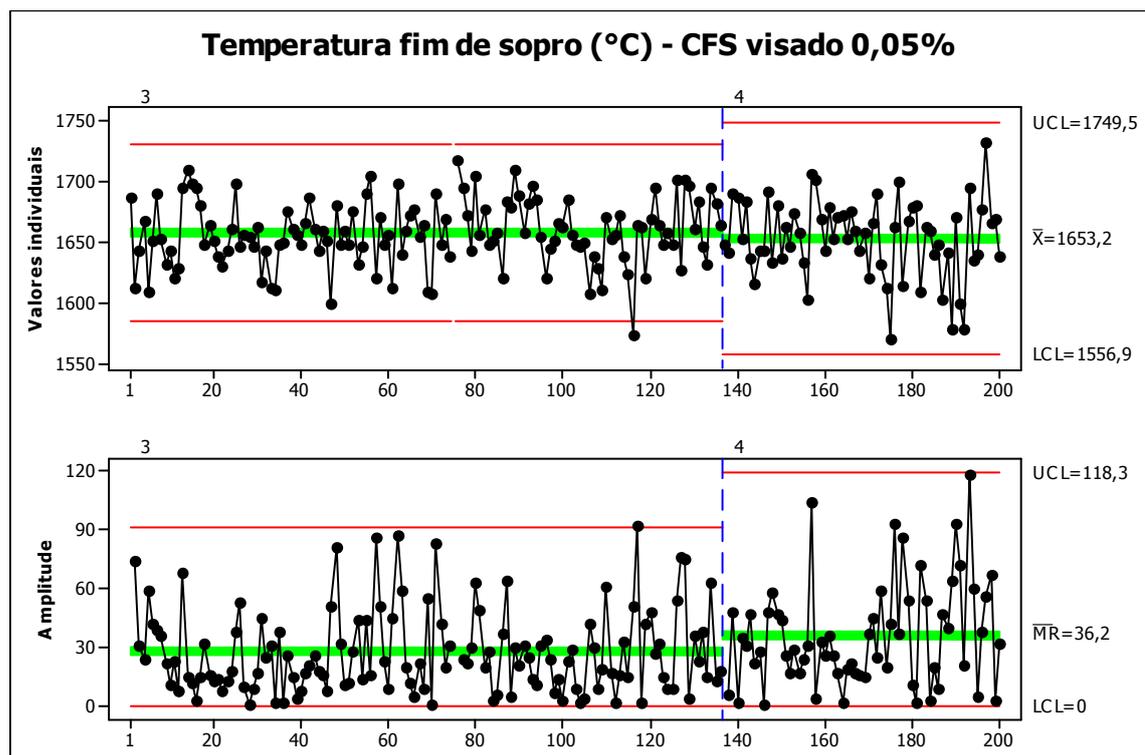


Figura 5.13: Gráfico IMR para temperatura fim de sopro para carbono visado 0,050%

#### - Teste T:

Two-sample T for TFS

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	135	1657,6	27,3	2,3
4	64	1653,2	32,6	4,1

Difference = mu (3) - mu (4)  
Estimate for difference: 4,40509  
95% CI for difference: (-4,90761; 13,71780)  
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,94

**P-Value = 0,350** DF = 106

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	135	23,9773	27,2710	31,5660
4	64	27,1145	32,5503	40,5680

Levene's Test (any continuous distribution)  
Test statistic = 2,25; **p-value = 0,135**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos a média da temperatura fim de sopro apresentou a mesma. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

### 5.3.4-Carbono fim de sopro visado 0,060% (600 ppm)

#### 5.3.4.1-Determinação dos Limites ou faixas de trabalho para variáveis ruído

Para determinar dos limites de trabalho para o %Si do gusa, peso do gusa e Mise au Mille, foi utilizado o gráfico Box-plot do MINITAB, onde as faixas estabelecidas foram:

Tabela V.4: Limites de trabalho das variáveis ruído

<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>DesvPad.</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Si_gusa(%)	0,33	0,095	0,12	0,567
Peso do gusa (ton.)	97,29	4,42	84	108,5
Mise au mille (kg/t)	877,43	29,67	807	940

Para análise, após o filtro das variáveis ruído, foram utilizadas 253 corridas sendo 98 corridas utilizando a lança de quatro furos e 155 corridas utilizando a lança de três furos, onde as seguintes variáveis respostas foram analisadas:

#### **5.3.4.2-Análise das variáveis respostas**

Para análise das variáveis respostas foi utilizado o teste de hipótese com objetivo de comparar se duas amostras possuem as mesmas características quanto a média e variância, onde as seguintes variáveis foram analisadas:

**- Tempo de sopro:**

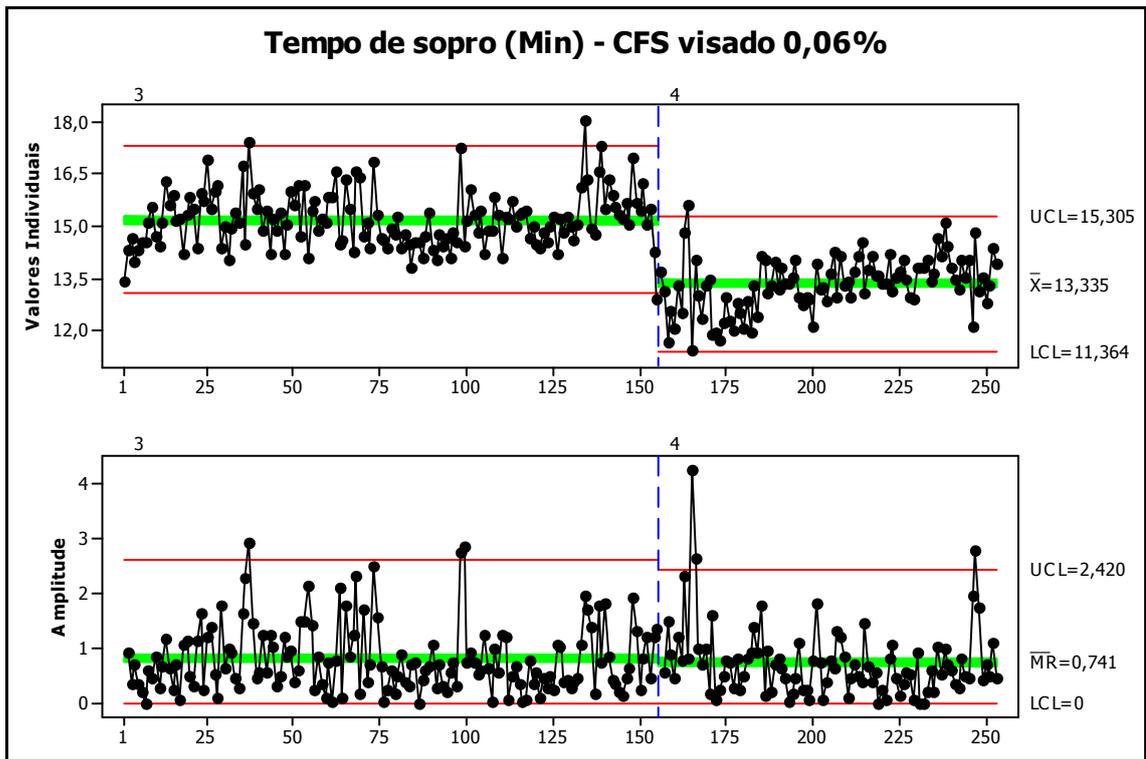


Figura 5.14: Gráfico IMR para tempo de sopro (min.) para carbono visado 0,060%

**Teste T:**

LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	155	15,197	0,827	0,066
4	98	13,335	0,806	0,081

Difference =  $\mu$  (3) -  $\mu$  (4)

Estimate for difference: 1,86238

95% CI for difference: (1,65524; 2,06951)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 17,72

**P-Value = 0,000** DF = 210

**-Teste Variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	155	0,733196	0,827131	0,947446
4	98	0,693824	0,805879	0,959027

F-Test (normal distribution)  
 Test statistic = 1,05; **p-value = 0,788**

Analisando o Teste T, como o valor de P-value  $< 0,05$ , pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos houve uma redução no tempo de sopro. Para o desvio padrão como P-Value  $> 0,05$ , pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que os desvios padrões são iguais.

### - Rendimento Metálico

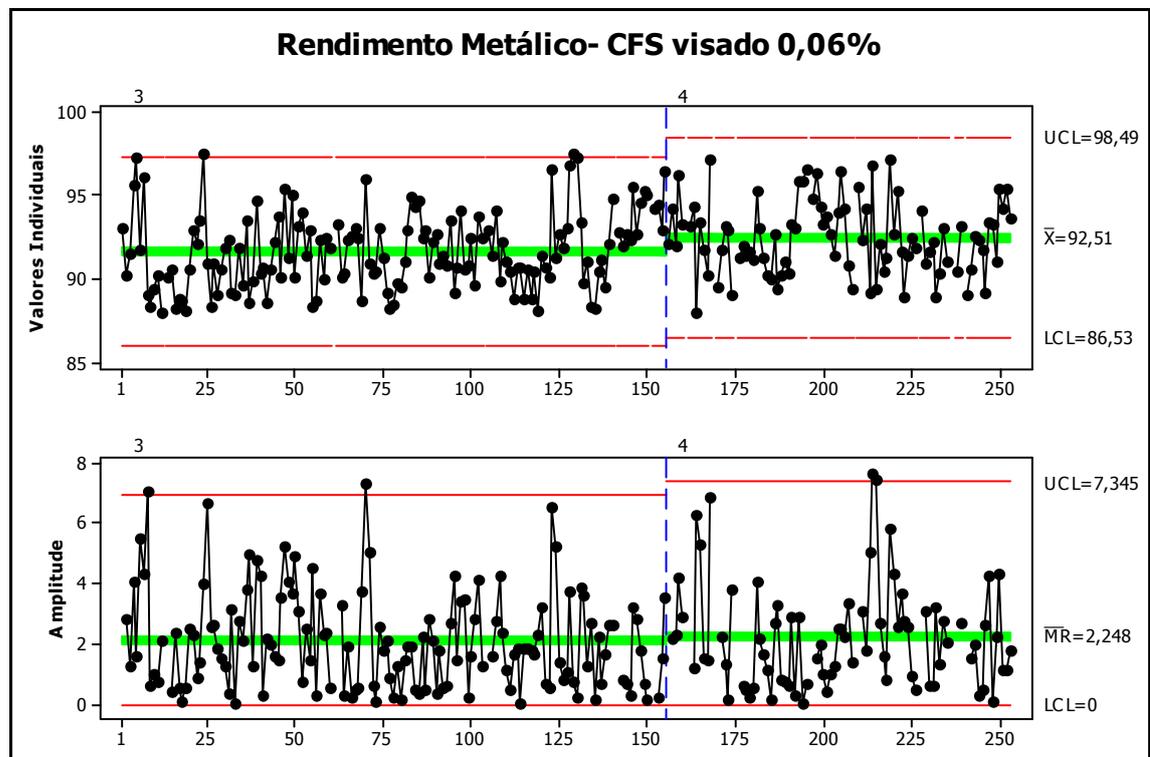


Figura 5.15: Gráfico IMR para rendimento metálico para carbono visado 0,060

### - Kruskal - Wallis:

LANÇA	N	Median	Ave Rank	Z
3	150	91,39	110,7	-2,71
4	89	92,34	135,7	2,71
Overall	239		120,0	
H = 7,34 DF = 1 P = 0,005				
H = 7,34 DF = <b>1</b> <b>P = 0,005</b> (adjusted for ties)				

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	131	1,94090	2,21159	2,56603
4	124	1,95675	2,24201	2,62013
Levene's Test (any continuous distribution)				
Test statistic = 0,31; p-value = <b>0,580</b>				

Analisando o Teste Kruskal-Wallis, como o valor de P-value <0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias não são iguais, ou seja, o rendimento metálico com a lança de quatro furos apresentou um melhor resultado do que com a lança de três furos. Para o desvio padrão como P-Value >0,05 os desvios padrões são iguais.

**- FeO da Escória LD**

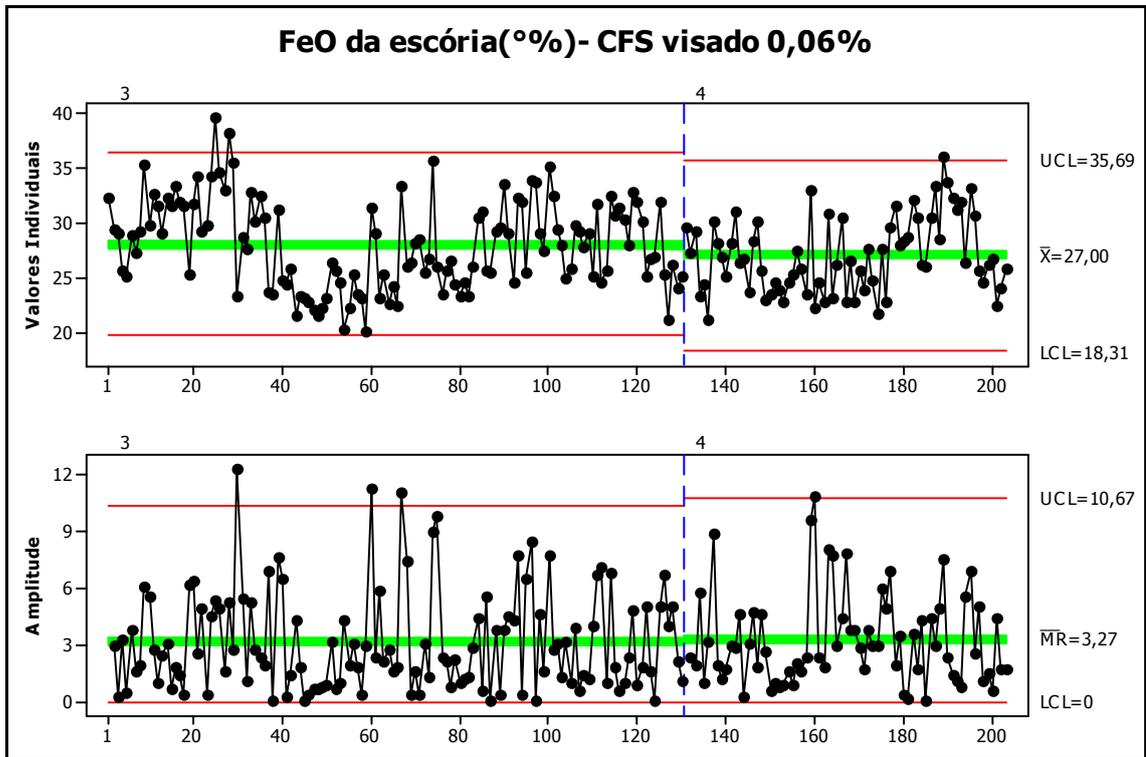


Figura 5.16: Gráfico IMR para FeO escória LD para carbono visado 0,060%

**- Kruskal-Wallis Test:**

LANÇA	N	Median	Ave Rank	Z
3	130	27,89	107,1	1,64
4	73	26,35	93,0	-1,64
Overall	203		102,0	

H = 2,70    DF = 1    P = 0,100  
H = 2,70    DF = 1    P = 0,100 (adjusted for ties)

**- Teste de variância:**

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	130	3,57787	4,07880	4,73538
4	73	2,89220	3,43451	4,21432

Levene's Test (any continuous distribution)  
Test statistic = 4,62; p-value = **0,033**

Como as distribuições dos dados do FeO não apresentaram distribuição normal, foi utilizado para análise o teste Kruskal Wallis, como o valor de P-value =0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais. Para o desvio padrão como P-Value < 0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de significância de 5% que os desvios padrões são diferentes, onde para a lança de quatro furos o desvio padrão é menor.

#### - Temperatura fim de sopro

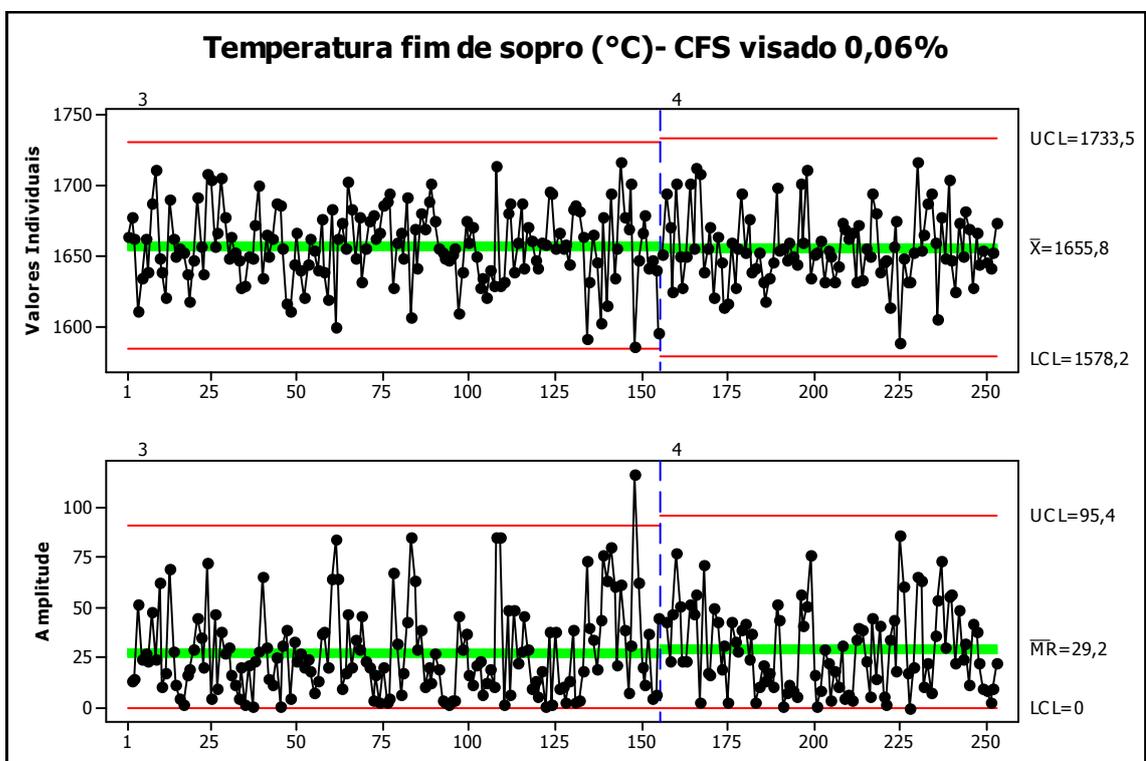


Figura 5.17: Gráfico IMR para temperatura fim de sopro (min.) para carbono visado 0,060%

### - Teste T:

Two-sample T for TFS				
LANÇA	N	Mean	StDev	SE Mean
3	155	1657,3	26,5	2,1
4	98	1655,8	25,3	2,6

Difference = mu (3) - mu (4)  
Estimate for difference: 1,40467  
95% CI for difference: (-5,14336; 7,95271)  
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,42  
**P-Value = 0,673** DF = 213

### - Teste de variância:

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations				
LANÇA	N	Lower	StDev	Upper
3	155	23,4579	26,4633	30,3127
4	98	21,7579	25,2719	30,0745

F-Test (normal distribution)  
Test statistic = 1,10; p-value = 0,627

Analisando o Teste T, como o valor de P-value >0,05, pode-se afirmar estatisticamente com um nível de confiança de 5% que as médias são iguais, ou seja, com a lança de quatro furos a média da temperatura fim de sopro apresentou a mesma. Para o desvio padrão a análise é a mesma, ou seja, como P-Value >0,05 os desvios padrões também são iguais.

## **6. CONCLUSÕES**

As conclusões serão divididas de acordo com as variáveis respostas analisadas durante o experimento, assim distribuídas:

### **Tempo de sopro**

Houve uma redução no tempo de sopro quando utilizada a lança de quatro furos em todas as faixas de carbono fim de sopro visado, esta redução foi em média de dois minutos.

Uma redução de dois minutos no tempo de sopro, nos leva ao fim do dia para uma fabricação de 30 corridas um ganho de 1 hora de produção, ou seja, possibilidade de fabricação de mais uma 1,5 corridas (~ 160 toneladas) /dia.

### **Rendimento metálico**

Não houve diferença significativa entre a lança de três furos e a lança de quatro furos, as médias foram praticamente iguais.

### **FeO da escória LD**

Tanto para lança de três furos e quatro furos o FeO de escória permaneceu elevado, trabalhos futuros vão ser realizados no intuito de redução do FeO.

### **Temperatura fim de sopro**

Não houve diferença significativa entre a lança de três furos e a lança de quatro furos, as médias foram praticamente iguais.

### **Conclusões Finais**

Os resultados obtidos vieram ao encontro do objetivado, que era implementar o bico de lança de quatro furos com uma redução de tempo de sopro mantendo no mínimo a

mesmo desempenho nos demais parâmetros de processo, tais como: Rendimento metálico, FeO da escória, temperatura fim de sopro.

## **7. TRABALHOS FUTUROS**

No sentido continuar aos trabalhos realizados são sugeridos os seguintes tópicos para futuros desenvolvimentos:

1 – Adequar os padrões de sopro da lança de quatro furos para a utilização da escória recirculada;

2 – Desenvolver um novo fornecedor nacional de bico de lança;

3 – Automatizar a medição da distância banho/lança (DBL) via Laser, devido a erro de medida ocasionando um desgaste prematuro do bico de lança devido;

4- Verificar a possibilidade de aumento de vazão de oxigênio com alteração do volume interno dos convertedores.

## 8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

ANDRADE,S.L– Análise da desfosforação do refino LD UFMG/USIMINAS,1979,p.17

BARÃO, C.- Sopro Combinado - Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio – ABM,2004,p.357

CAMPOS, VICENTE FALCONI. Tecnologia de fabricação do aço líquido, v 1, 1980.

DÍAZ, MANUELA C.; KOMAROV, SERGEY V.; SANO, MASAMICHI. Bubble Behavior and Absorption Rate in Gas Injection Through Rotary Lances, v 37, nº1, 1997, p 1. Publisher: ISIJ International.

FABRITIUS, T.M.J.; LUOMALA, M.J.; VIRTANEN, E.O.; TENKKU, H.; FABRITIUS, T.L.J.; SIIVOLA, T.P.; KÄRKKI, J.J. Effect of Bottom Nozzle Arrangement on Splashing and Spitting in Combined Blowing Converter , v 42, nº 8, 2002, p 861. Publisher: ISIJ International.

FARIA,M.A.A – Operação de Refino de Aço - Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio – ABM,2004,p.242

HENRIQUES,B.R.; NAKAMURA,T.A, Desenvolvimento de bico de lança de oxigênio de seis furos na CST- ABM,1996

HIGUCHI, YOSHIHIKO, TAGO, YUKARI. Effect of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, v 43, nº 9, 2003, p 1410. Publisher: ISIJ International.

HIGUCHI, YOSHIHIKO; TAGO, YUKARI. Effect of Lance Design on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process, v 41, nº 12, 2001, p 1454. Publisher: ISIJ International.

KEILMAN, L. M. Oxygen Lance Design Modification to Improve the Lance Lif.

KORIA, SATISH C.; SINGH, SARBJIT. Experimental Investigations on the Design of Gas Injecting Lances, v 29, nº 8, 1989, p 650. Publisher: ISIJ International.

KUMAGAI, TAKEHIKO; IGUCHI, MANABU. Instability Phenomena at Bath Surface Induced by Top Lance Gas Injection, v 41, 2001, Supplement Page. S052. Publisher: ISIJ International.

MARTINS, A.A – Lança de Oxigênio e Características do jato – Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio – ABM,2004,p.389

NAITO, KEN-ICHIRO; OGAWA, YUJI; INOMOTO, TAKEO; KITAMURA, SHINYA; YANO, MASATAKA. Characteristics of Jets from Top-Blown Lance in Converter, v 40, nº 1, 2000, p 23. Publisher: ISIJ International.

ROMÃO, J.B. Curso LD – Belgo Usina Monlevade, 2002

SMITH, G.C. Multiple Jet Oxygen Lances – Theoretical analysis and correlation.

TAGO, YUKARI; HIGUCHI, YOSHIHIKO. Fluid Flow Analysis of Jets from Nozzles in Top Blown Process, v 43, nº 2, 2003, p 209. Publisher: ISIJ International.

VIANA,J.F- Desenvolvimento do Sopro de Oxigênio com lança de jato coerente na Usiminas – ABM, 2004,p.91-99

WERKEMA, M.C.C. – Apostila para treinamento do programa 6 $\sigma$  .p.2.5-2.6, março, 2000.

## **Anexo 1 – Cálculo da Vazão máxima de trabalho**

Os principais parâmetros a serem considerados são:

- Volume útil (Vu)
- Volume da escória (Vesc)
- Volume de aço (Vaço)
- Vazão de Oxigênio ( Vo)

O volume útil do convertedor deve ser capaz de conter o metal, a escória e o gás gerado pela oxidação do carbono, durante o decorrer da soproagem, especialmente durante o período de descarburização máxima e formação da emulsão metal-gás-escória. Considerando que o tempo de residência dos gases no interior do convertedor numa temperatura de 1500° e pressão de 1,5 atm, é de 1,2 segundos, o volume útil do convertedor será dado por :

$$\mathbf{Vu = Vaço + Vesc + 10,4 \times Vo}$$

onde:

Vu = volume útil do convertedor

Vaço = volume do metal

Vesc = volume da escória

Vo = vazão do oxigênio (Nm<sup>3</sup>/min)

Se considerarmos o peso da escória como aproximadamente 10 % do peso do metal, sendo a densidade do aço de 7 Kg/dm<sup>3</sup> e da escória de 2 Kg/dm<sup>3</sup>, vem:

$$Vu = 0,2 CF + 10,4 \times Vo$$

Sendo CF a capacidade do convertedor em toneladas.

No caso de Monlevade para uma vazão do oxigênio em 350 (Nm<sup>3</sup>/min) teremos:

$$Vu = 0,2 \times 110 + 10,4 \times (350/60)$$

$$Vu = 82,6 \text{ m}^3$$

Como o volume útil de nosso convertedor é de 92 m<sup>3</sup> , pelos mesmos cálculos poderíamos operar com uma vazão de :

$$V_o = \left( \frac{V_u - 0,2 * CF}{10,4} \right) * 60$$

$$V_o = \left( \frac{92 - 0,2 * 110}{10,4} \right) * 60$$

$$V_o = 403,8 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

A profundidade ou altura do banho influencia na circulação do metal e conseqüentemente na dissolução da sucata.

Sendo assim para o convertedor da Belgo-Usina Monlevade a máxima vazão permitida com esta dimensões é 400 Nm<sup>3</sup>/ min.

## Anexo 2 – Cálculo de padrões de sopro para lança de quatro furos

Para o cálculo dos padrões de sopro para lança de quatro furos foram levados em consideração os padrões existentes para lança de três furos, onde as regras para determinação do padrão a ser utilizado para sopro numa determinada corrida foram mantidas.

A vazão do oxigênio secundário foi mantida constante durante todo o sopro.

Para lança de quatro furos foi mantido o mesmo  $L/L_o$  encontrado para lança de três furos, daí foi calculado novas vazões de oxigênio e altura da lança para padrões de sopro com lança de quatro furos, através das fórmulas:

- Profundidade de penetração do jato de  $O_2$

$$L = L_{ho} * EXP(-0,78(\frac{h}{L_{ho}}))$$

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

$$L_{ho} = 63 * (\frac{Q}{d_{eq}})^{2/3}$$

$D_{eq}$ : Diâmetro da secção crítica (mm)

$$d_{eq} = n_f * (\frac{dt}{Kn})$$

Como exemplo, abaixo o padrão 1 para lança de três furos e quatro furos:

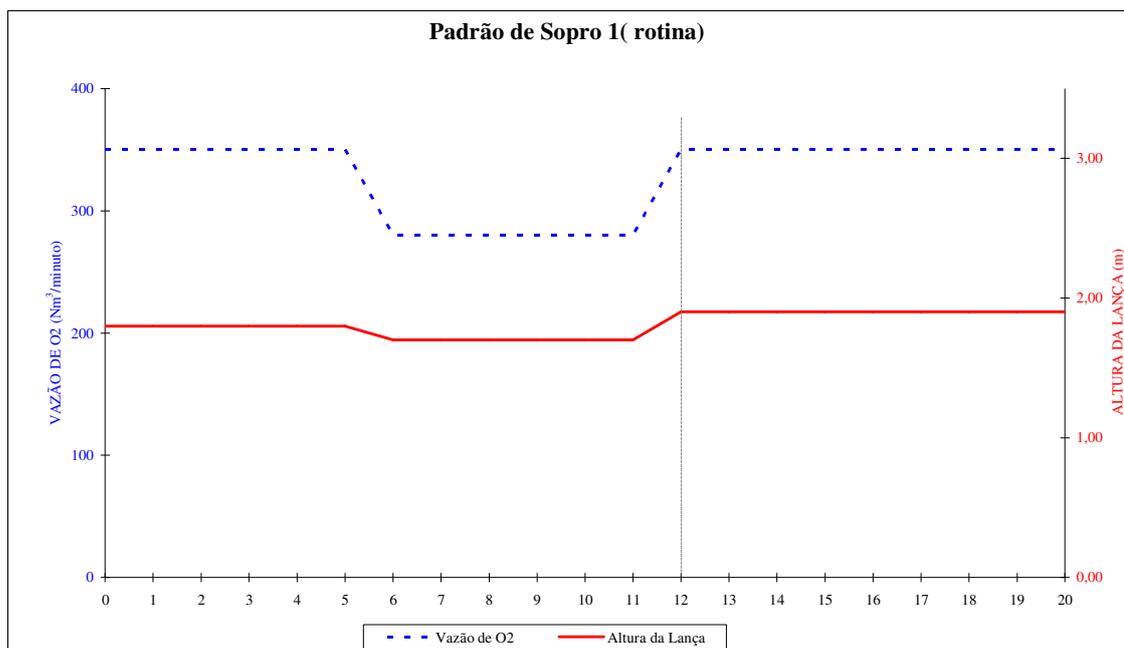


Figura 1: Representação esquemática do padrão de sopro 1 (rotina) para lança de três furos

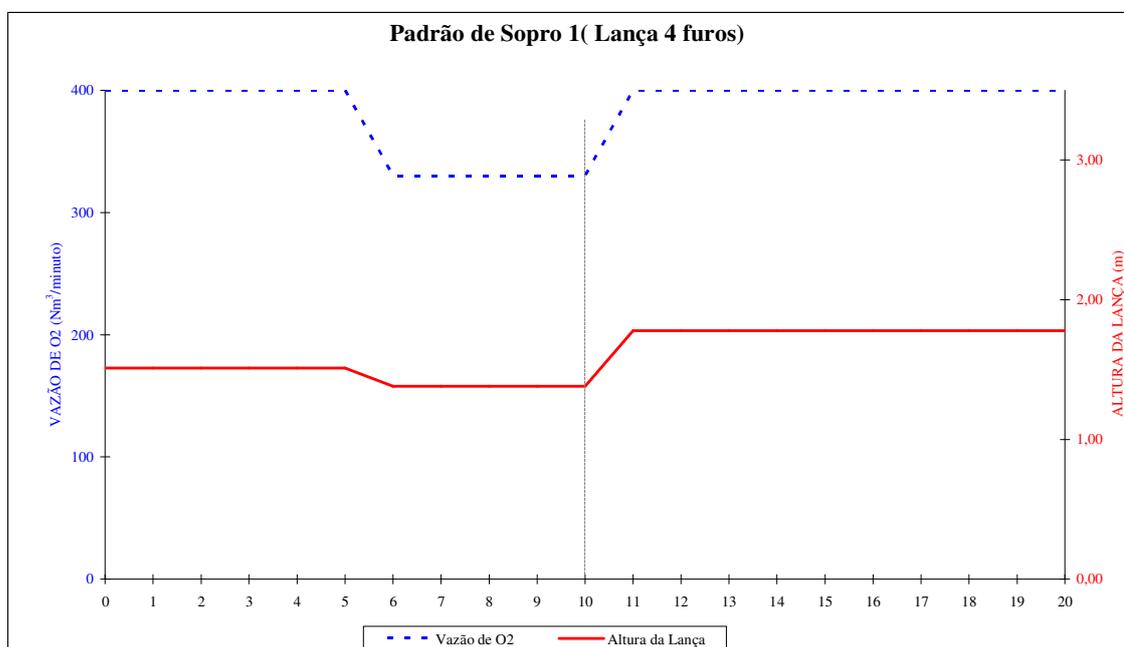


Figura 2: Representação esquemática do padrão de sopro 1 para lança de quatro furos

Pode ser verificado na figura acima um aumento de vazão e conseqüentemente uma diminuição na altura de lança.

Este cálculo foi realizado para todos os padrões de sopro existentes para a lança de três furos.

Depois de calculados os modelos para lança de quatro furos foram implementados no modelo de sopro através da tela APS (Gerenciamento dos padrões de sopro) no modelo de sopro.

### **Anexo 3 – Teste de Normalidade para as variáveis respostas**

Para o cálculo dos testes de médias e variância das variáveis respostas foi necessário primeiramente realizar o teste de normalidade para cada variável resposta no intuito de verificar se o teste a ser adotado, teste t (distribuição normal) ou teste Kruskal Wallis (distribuição não normal).

Os gráficos de normalidade devem ser interpretados como um teste de hipótese, onde a hipótese nula ( $H_0$ ) e a hipótese alternativa são avaliadas, ou seja se  $P\text{-value} < \alpha$ , é aceita a hipótese nula.

$H_0$ : os dados não são normalmente distribuídos

$H_1$ : os dados são possuem distribuição normal

Onde  $\alpha$  é o nível de significância, ou seja, é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira. Se a hipótese nula é rejeitada ao nível de significância  $\alpha$ , a hipótese alternativa é assumida com um nível de confiabilidade de  $100 * (1 - \alpha) \%$ . O nível de significância adotado foi 5%, ou seja, 0,05.

Para as variáveis onde  $P\text{-value}$  é maior que  $\alpha$ , assumimos que as variáveis possuem distribuição normal.

# 1- Carbono fim de sopro visado 0,030% (300 PPM)

## 1.1-Tempo de sopro (min.)

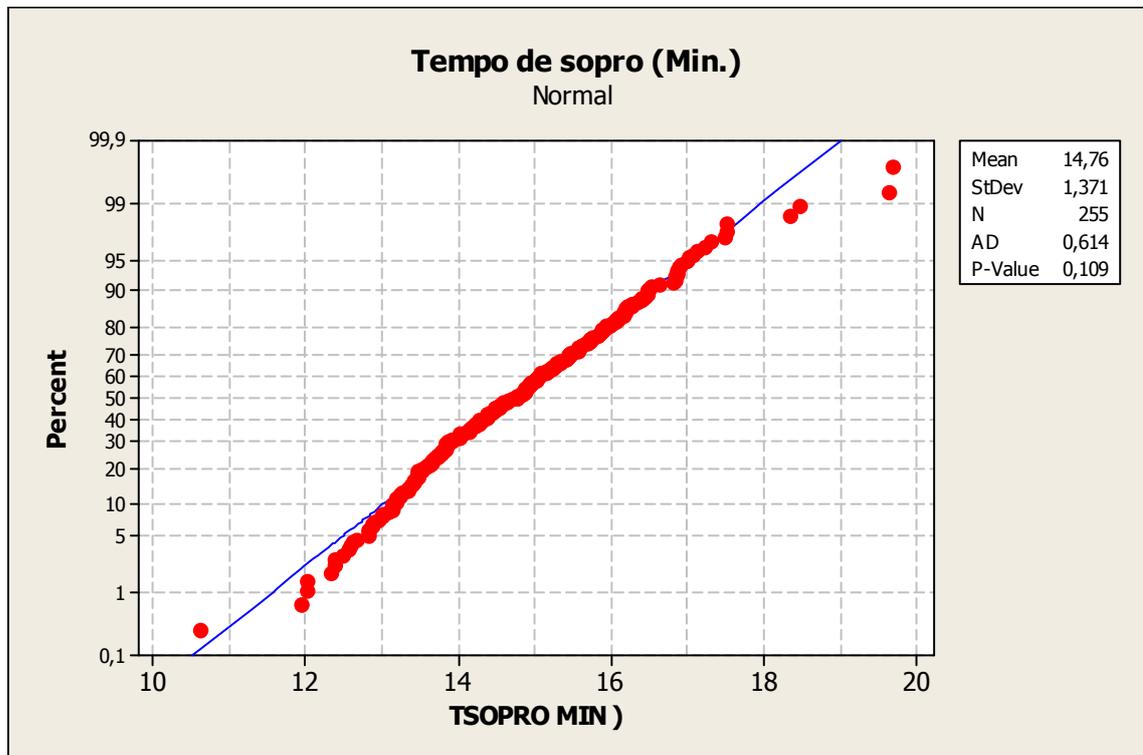


Figura 1: Teste de normalidade tempo de sopro para CFS visado 0,03

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável tempo de sopro possui distribuição normal.

## 1.2-Rendimento Metálico

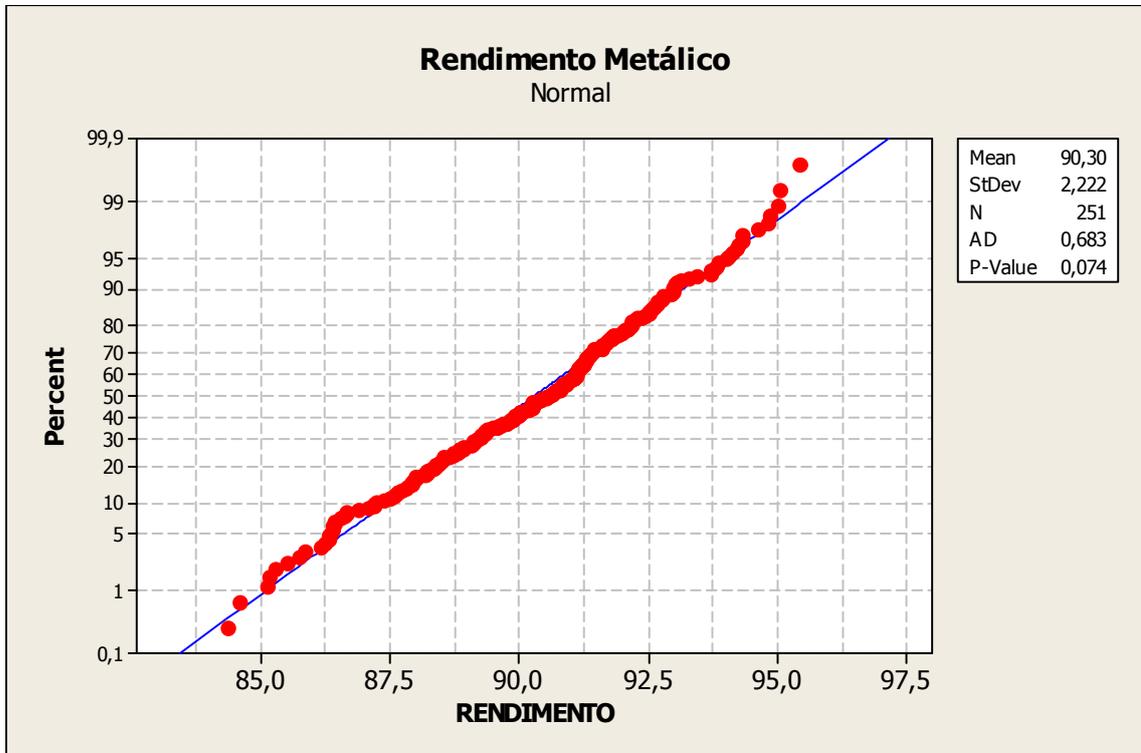


Figura 2: Teste de normalidade rendimento metálico para CFS visado 0,03

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

### 1.3-FeO escória LD

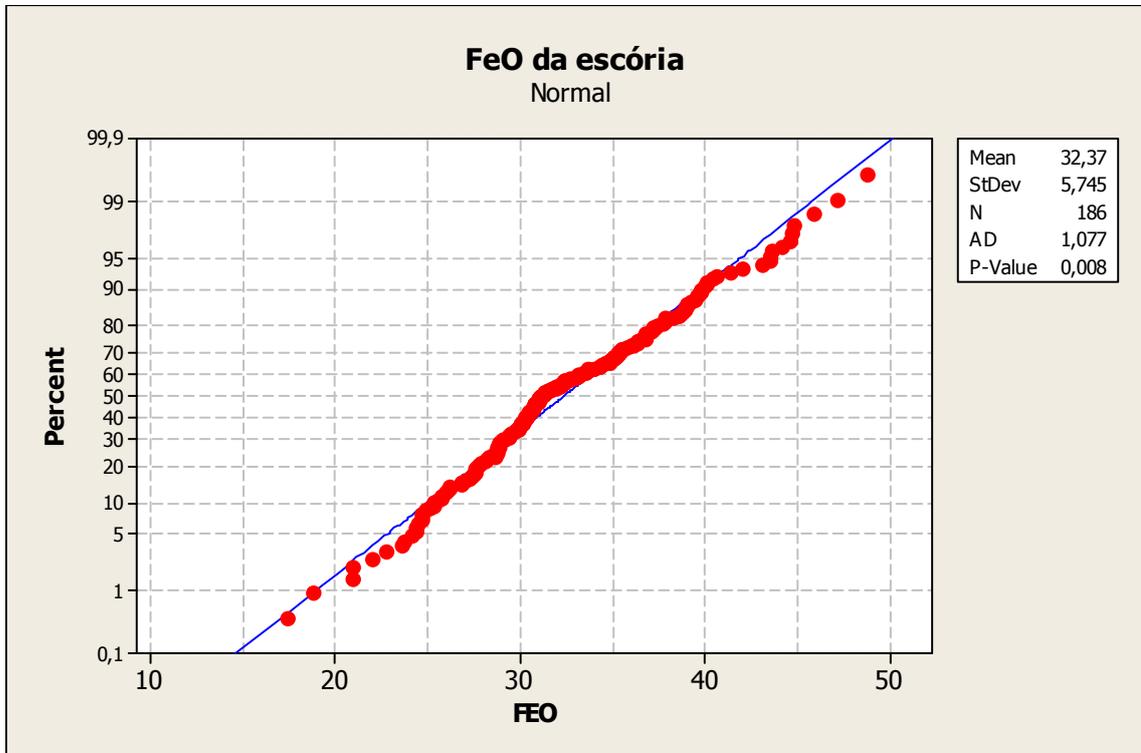


Figura 3: Teste de normalidade FeO para CFS visado 0,03

Como P\_value é menor que  $\alpha$ , assumimos que a variável FeO da escória LD não possui distribuição normal.

#### 1.4-Temperatura fim de sopro

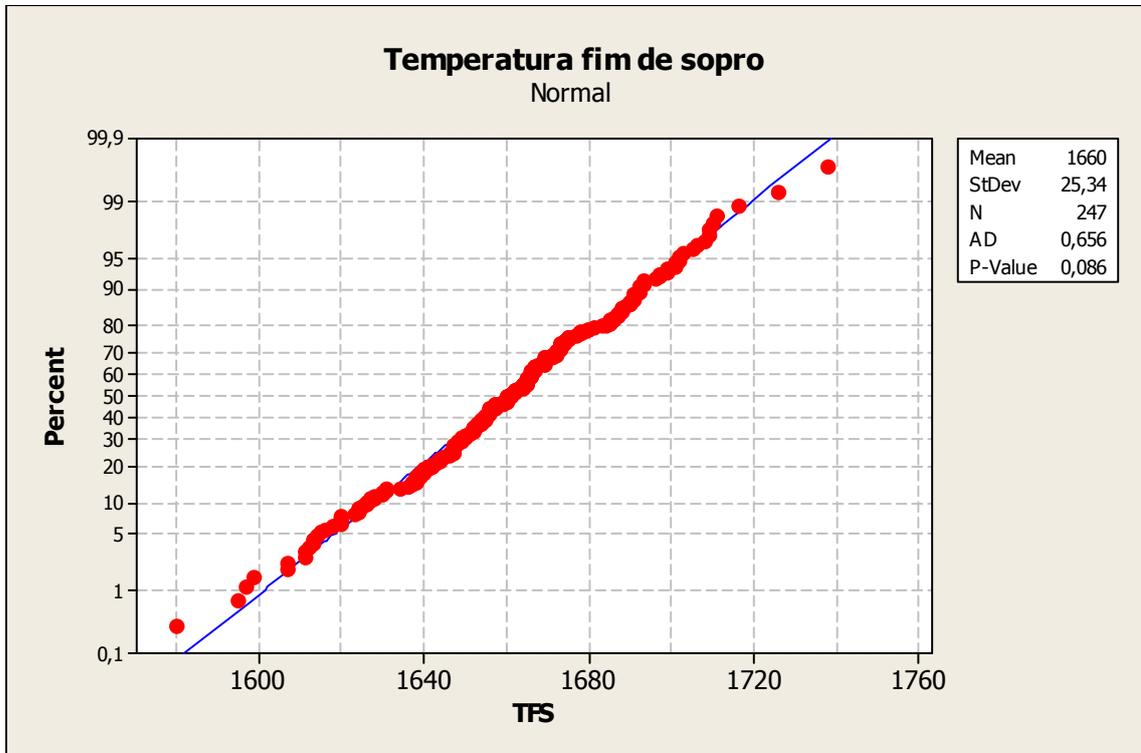


Figura 4: Teste de normalidade temperatura fim de sopro para CFS visado 0,03

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

## 2- Carbono fim de sopro visado 0,040% (400 PPM)

### 2.1-Tempo de sopro (min.)

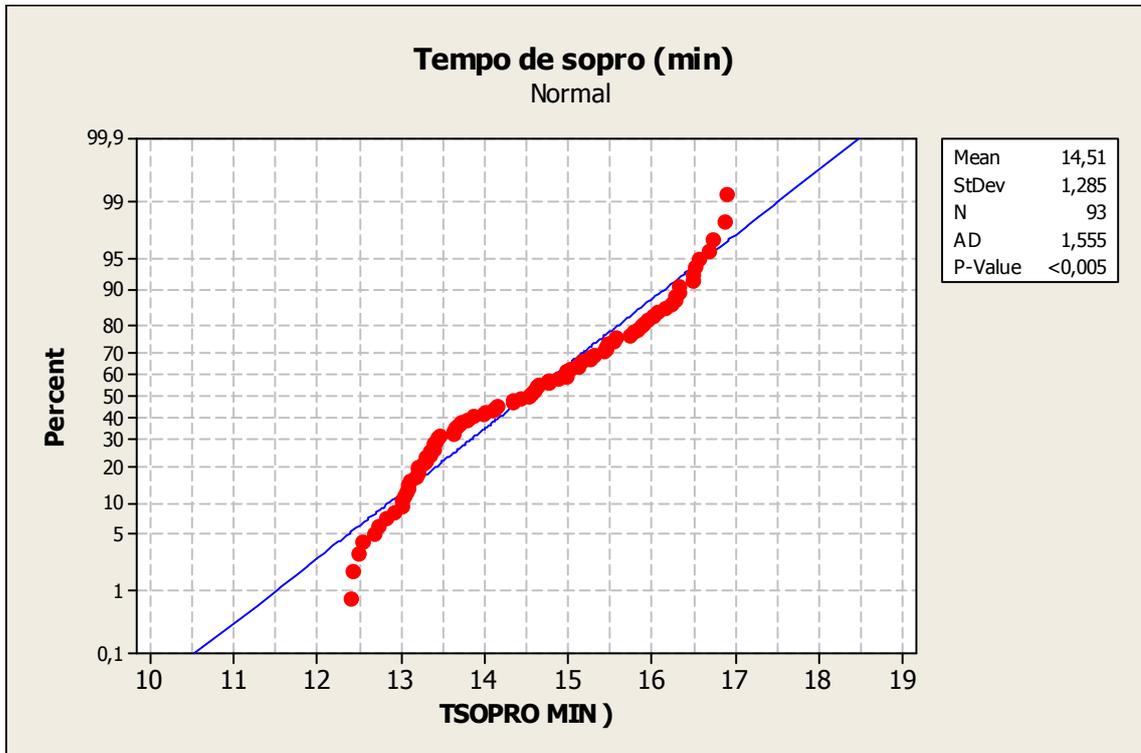


Figura 5: Teste de normalidade tempo de sopro para CFS visado 0,04%

Como  $P\_value$  é menor que  $\alpha$ , assumimos que a variável tempo de sopro não possui distribuição normal.

## 2.2-Rendimento Metálico

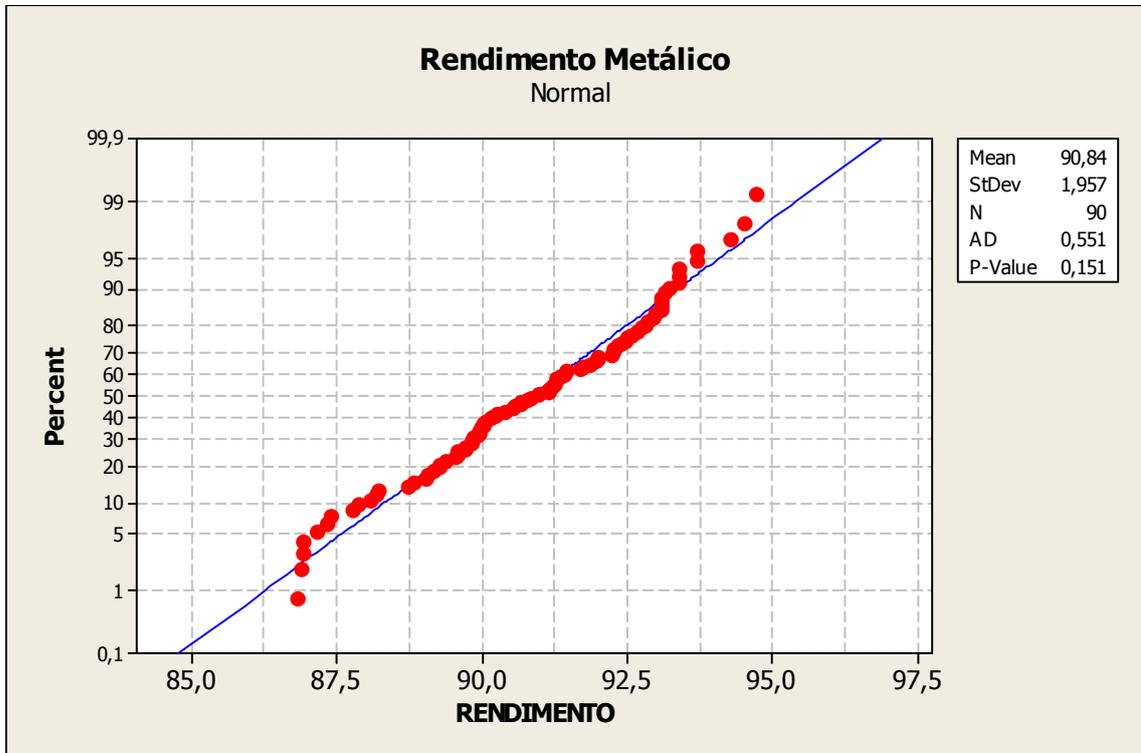


Figura 6: Teste de normalidade rendimento metálico para CFS visado 0,04%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

### 2.3-FeO escória LD

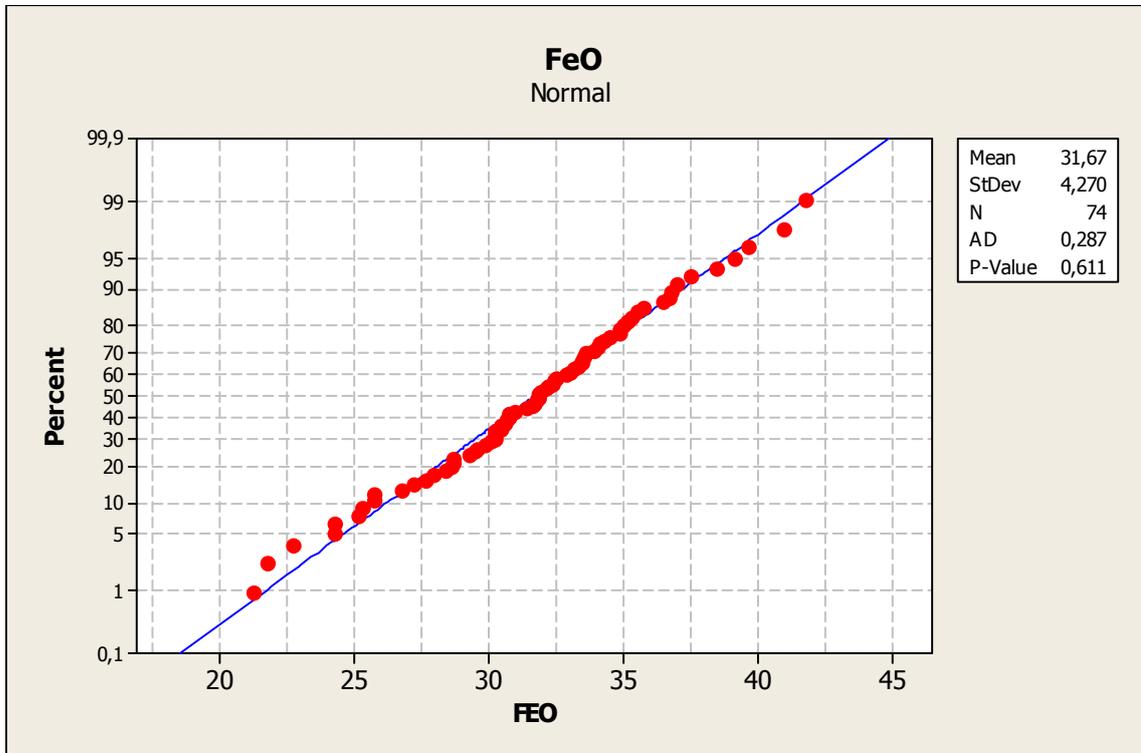


Figura 7: Teste de normalidade FeO para CFS visado 0,04%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável FeO da escória LD possui distribuição normal.

## 2.4-Temperatura fim de sopro

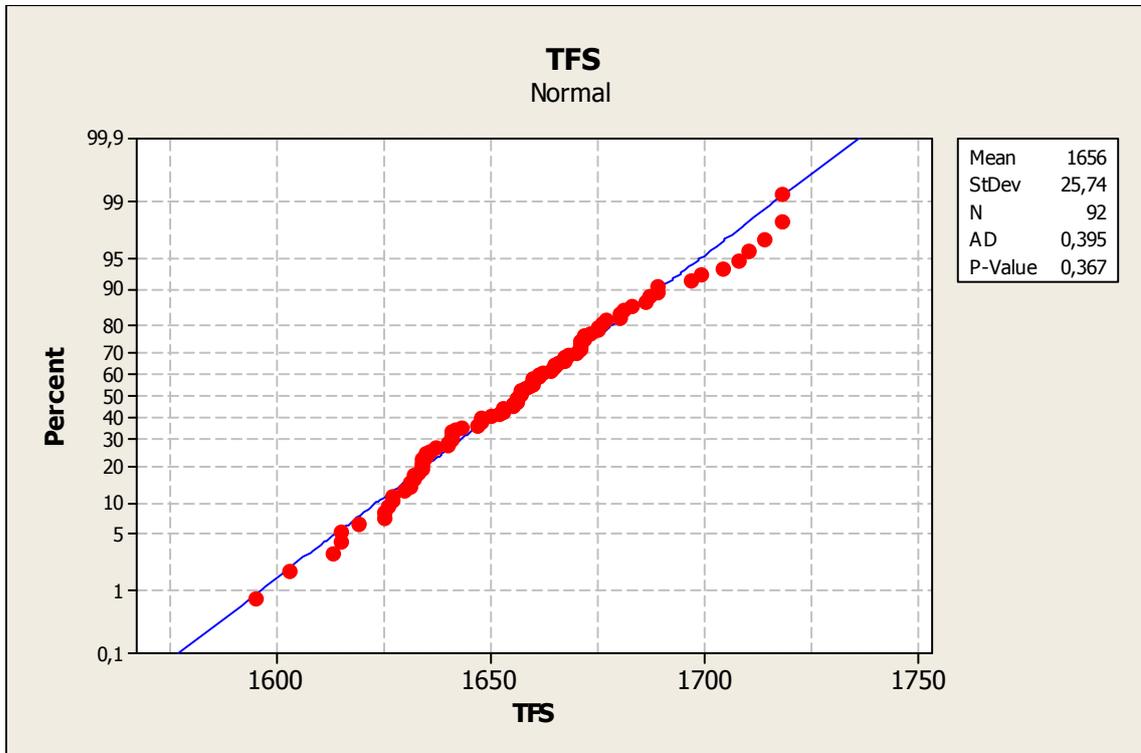


Figura 4: Teste de normalidade temperatura fim de sopro para CFS visado 0,04

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

### 3- Carbono fim de sopro visado 0,050% (500 PPM)

#### 3.1-Tempo de sopro (min.)

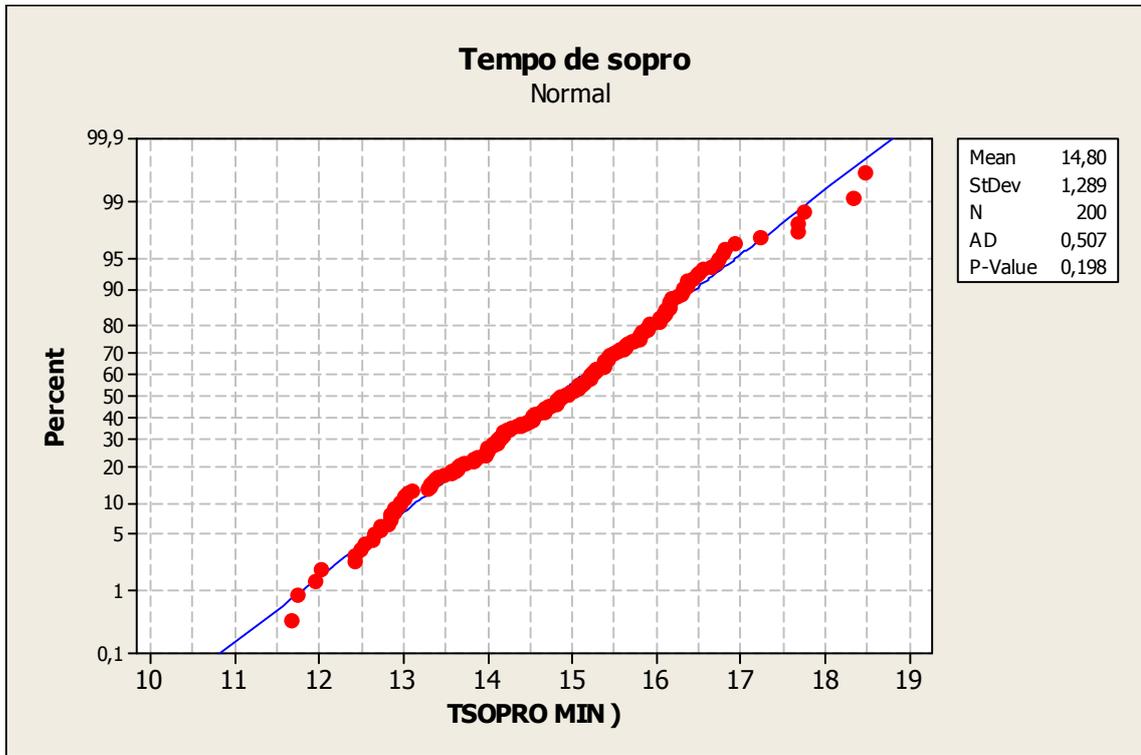


Figura 9: Teste de normalidade tempo de sopro para CFS visado 0,05%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável tempo de sopro possui distribuição normal.

### 3.2-Rendimento Metálico

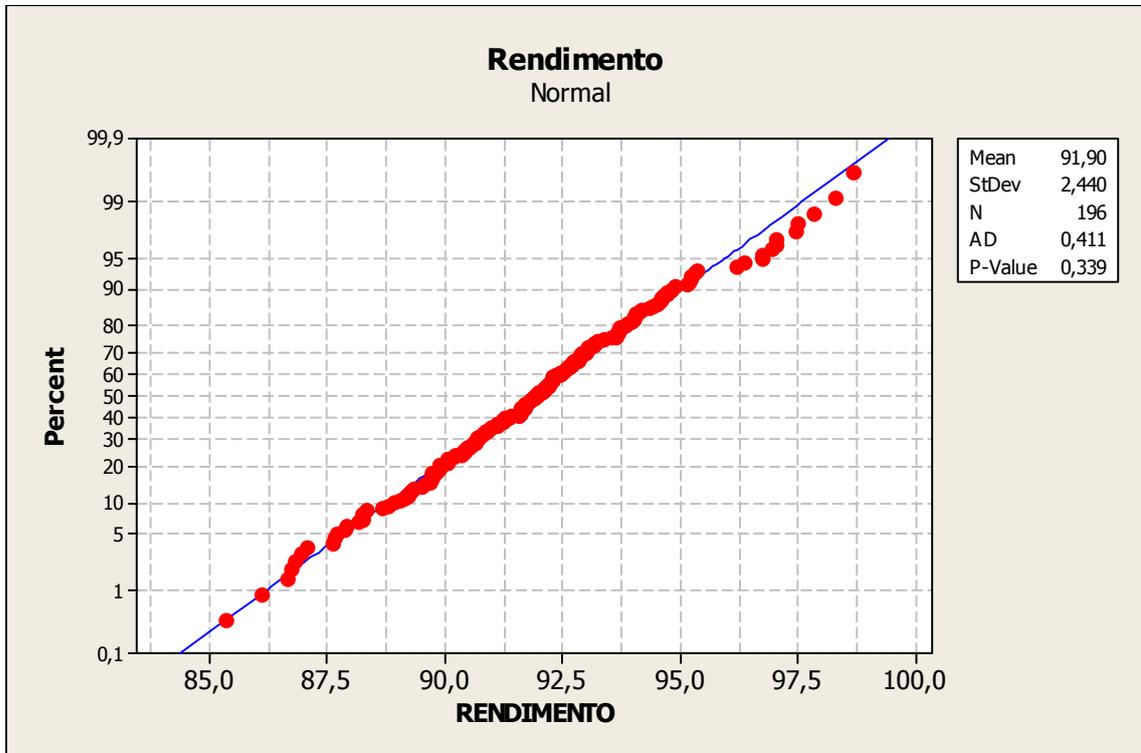


Figura 10: Teste de normalidade rendimento metálico para CFS visado 0,05%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

### 3.3-FeO escória LD

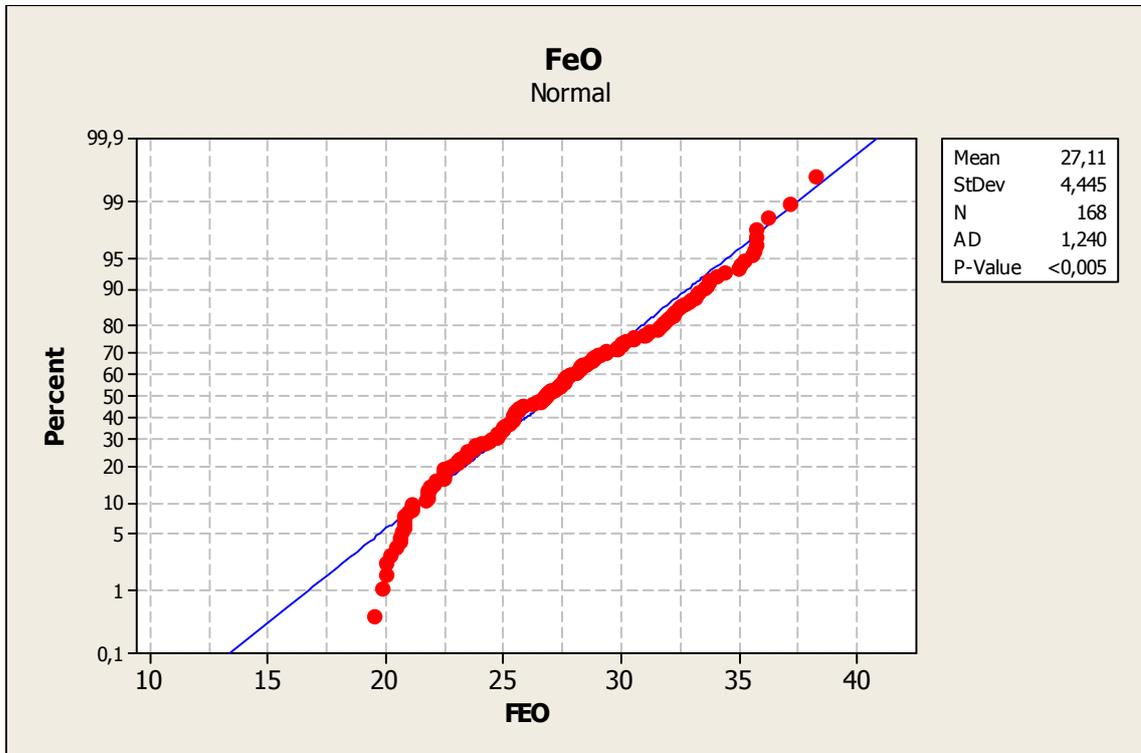


Figura 11: Teste de normalidade FeO para CFS visado 0,05%

Como P\_value é menor que  $\alpha$ , assumimos que a variável FeO da escória LD não possui distribuição normal.

### 3.4-Temperatura fim de sopro

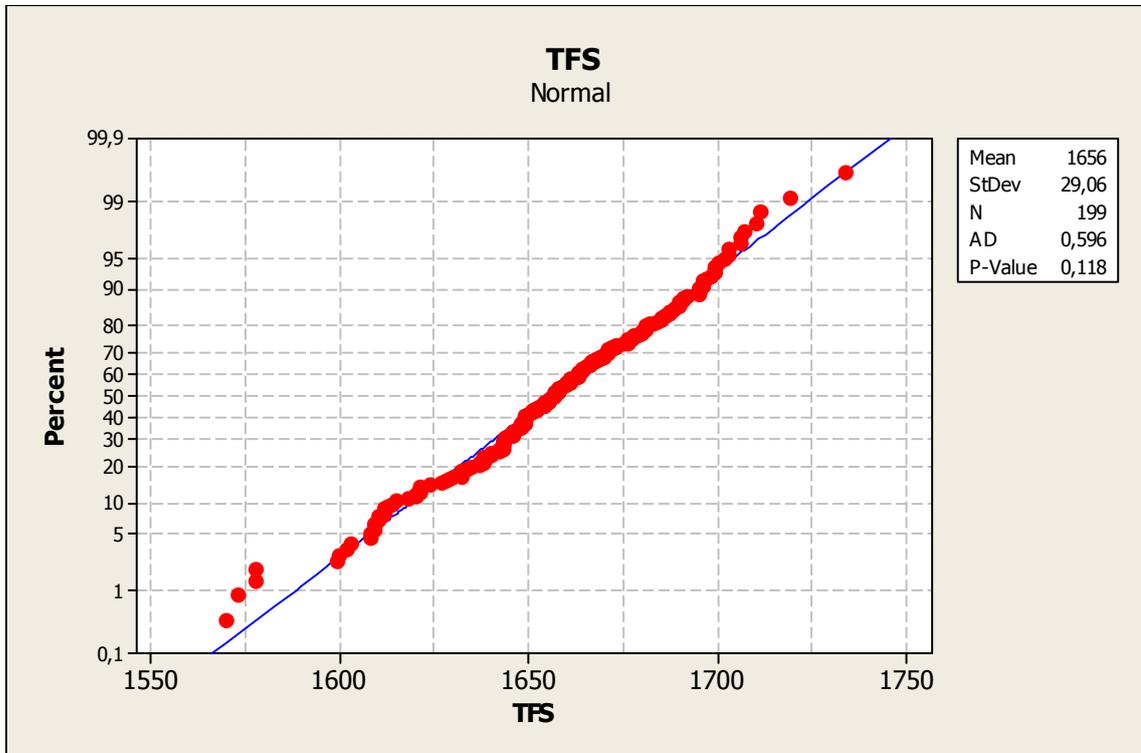


Figura 12: Teste de normalidade temperatura fim de sopro para CFS visado 0,05%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.

#### 4- Carbono fim de sopro visado 0,060% (600 PPM)

##### 4.1-Tempo de sopro (min.)

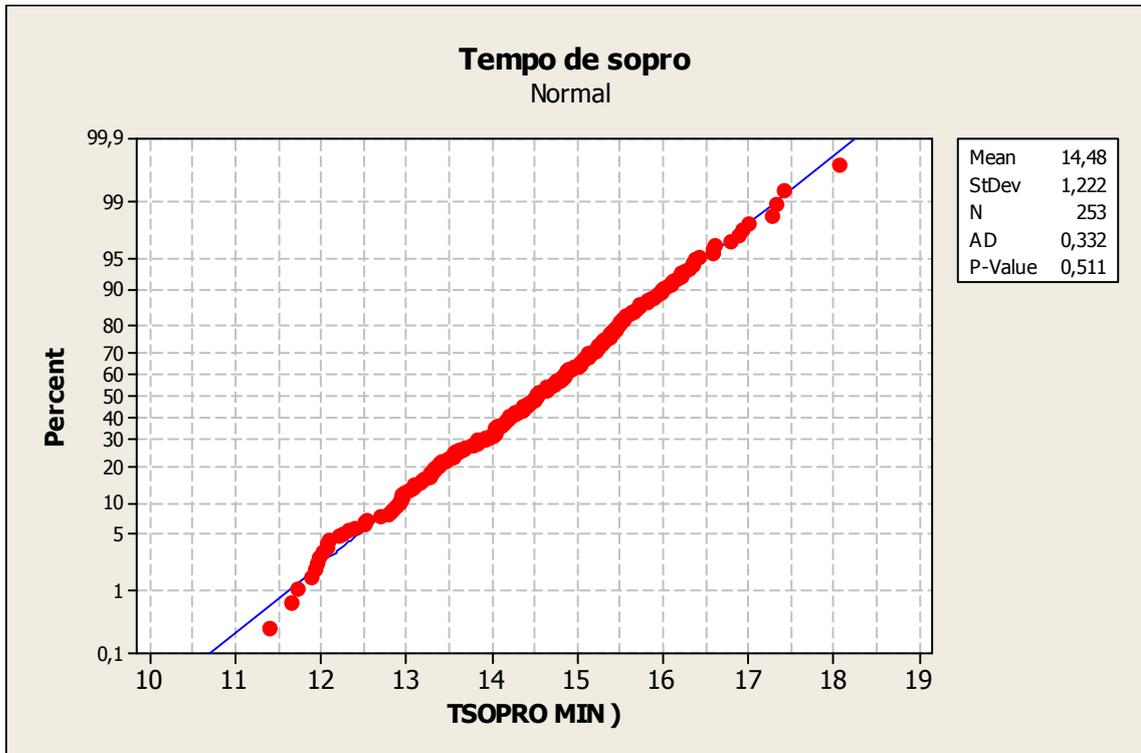


Figura 13: Teste de normalidade tempo de sopro para CFS visado 0,06%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável tempo de sopro possui distribuição normal.

## 4.2-Rendimento Metálico

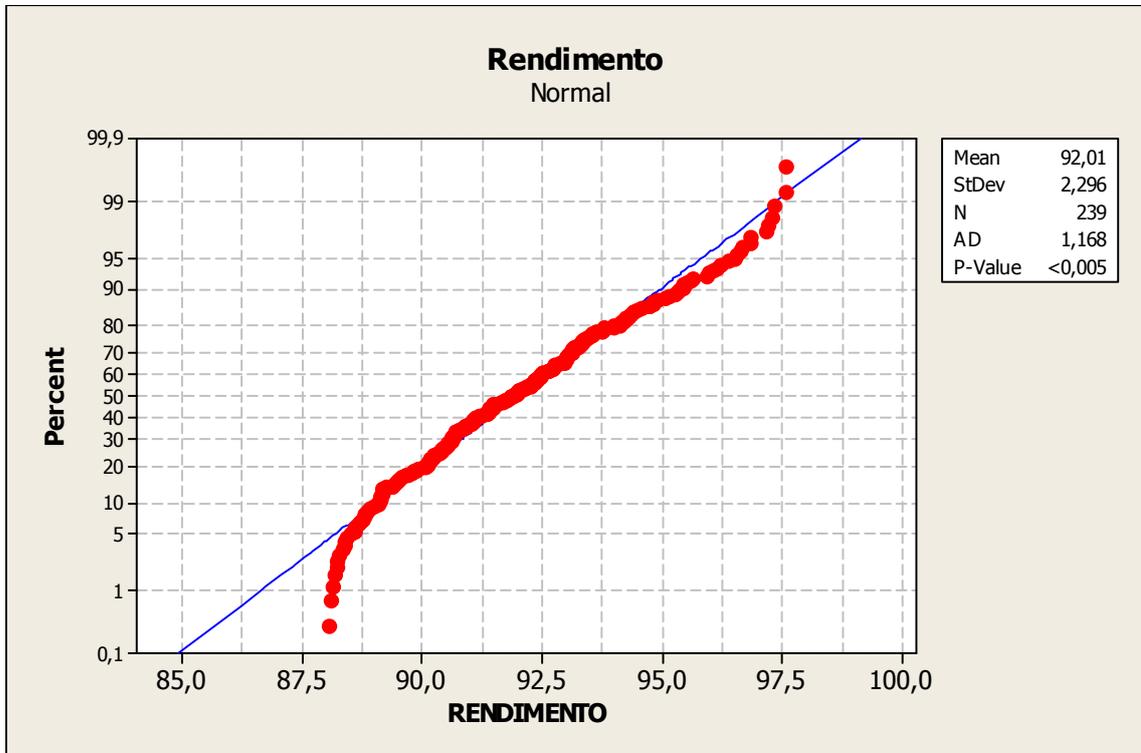


Figura 14: Teste de normalidade rendimento metálico para CFS visado 0,06%

Como P\_value é menor que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico não possui distribuição normal.

### 4.3-FeO escória LD

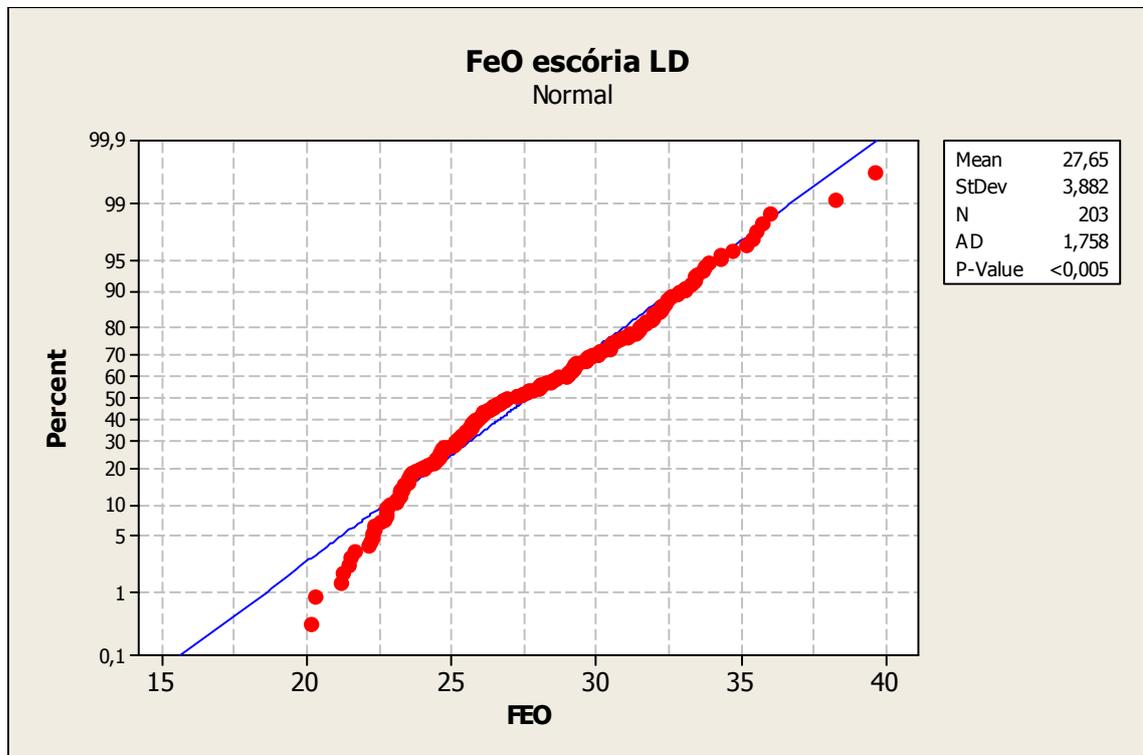


Figura 15: Teste de normalidade FeO para CFS visado 0,06%

Como P\_value é menor que  $\alpha$ , assumimos que a variável FeO da escória LD não possui distribuição normal.

#### 4.4-Temperatura fim de sopro

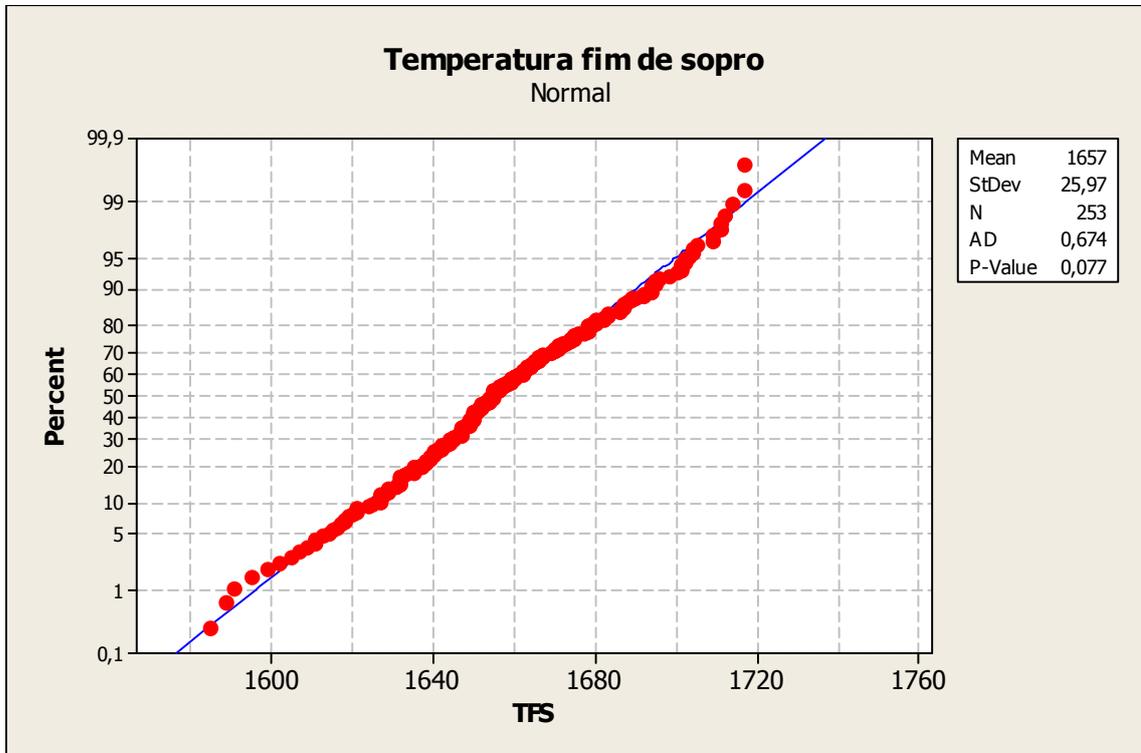


Figura 16: Teste de normalidade temperatura fim de sopro para CFS visado 0,06%

Como P\_value é maior que  $\alpha$ , assumimos que a variável rendimento metálico possui distribuição normal.