

MARCOS FERNANDO MORAES COELHO

**DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA
PRODUÇÃO DE GUSA EM ALTOS FORNOS**

**São Paulo
2008**

**ESP/SO
2008
C65m**

MARCOS FERNANDO MORAES COELHO

DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA
PRODUÇÃO DE GUSA EM ALTOS FORNOS

Monografia apresentada ao
Programa de Educação
Continuada da Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo, para a
conclusão de MBA em
Siderurgia.

São Paulo
2008

MARCOS FERNANDO MORAES COELHO

DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA
PRODUÇÃO DE GUSA EM ALTOS FORNOS

1826809

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800007513

MBA/Si 2008
C 65 m

m 2008 K

Monografia apresentada ao
Programa de Educação
Continuada da Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo, para a
conclusão de MBA em
Siderurgia.

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Orientador: Professor Doutor
Cyro Takano

São Paulo
2008

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que contribuíram no percurso desta árdua jornada.

Em especial , à minha companheira de todos os momentos Kátia , cuja presença foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus , pela minha vida ontem , hoje e sempre ,

A todos os professores, que, pacientemente, dedicaram seu tempo e seus conhecimentos aos meus próprios conhecimentos,

Ao meu orientador, professor doutor Cyro Takano, pelo apoio e incentivo em todo o percurso,

À minha companheira Kátia, sempre presente ao meu lado, pelas palavras de incentivo e pela compreensão constantes

Ao meus companheiros de Cosipa , Superiores , Pares , Colegas de Curso ou Subordinados que me sustentaram na realização deste projeto pessoal .

A Companhia Siderúrgica Paulista Cosipa , pela oportunidade e pelo patrocínio.

**“No meio de qualquer dificuldade
encontra-se a oportunidade”.
(Albert Einstein)**

**“Na natureza nada se cria,
nada se perde,
tudo se transforma”.
(Louis A. Lavoisier)**

RESUMO

Acompanhando a tendência mundial de evolução em todas as áreas industriais , a tecnologia siderúrgica tem acompanhado constantemente com avanços significativos.

O processo de Alto Forno tem mostrado por si mesmo uma habilidade de se adaptar a essa constante mudança em termos matéria prima e recuperação de energia. Esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento tem proporcionado estabilidade no processo , capacidade de alta performance , mesmo sob condições operacionais adversas e com variações mais rigorosas.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte de algumas tecnologias inseridas no Alto Forno , atendendo a esses pré-requisitos ,levando em conta principalmente elevada produtividade , baixo consumo de coque e operação ambientalmente correta. O caso particular de injeção de materiais na ventaneiras foi aprofundado.

Dentre as possibilidades , a Injeção de Plásticos na forma de combustível é uma contribuição que vem se revelando cada vez mais importante , pois esta alternativa viabiliza o uso sustentado do plástico como material, permitindo ainda que se reduza o custo operacional das siderúrgicas ao mesmo tempo em que elas cumprem mais um papel social, contribuindo com a comunidade para se resolver um problema que é a geração de rejeitos e que vem se tornando cada vez mais grave no que se refere impacto ao meio ambiente .

Palavras-chave: Alto-Forno. Tecnologia . Processo . Novos equipamentos .Injeção nas ventaneiras . Injeção de Plásticos .

ABSTRACT

Following the global trend of development in all industrial areas, the steel technology is constantly accompanied by significant advances.

The process of Blast Furnace has shown itself an ability to adapt to this constant change in raw material and energy recovery. Efforts continued research and development has provided stability in the process, capable of high performance, even under adverse operating conditions and variations with more stringent.

This paper aims to present the state of the art technology included in some of Blast Furnace in view of these pre-conditions, taking into account particularly high productivity, low consumption of coke and environmentally correct operation.

The particular case of injection of material in tuyeres was deepened.

Among the possibilities, the injection of Plastics in the form of fuel is a contribution that has been showing increasingly important because this alternative enables the sustainable use of plastics as materials, and also that it reduces the operational cost of steel at the same time they meet a more social role, contributing to the community to solve a problem that is the generation of tailings and that is becoming increasingly serious impact in relation to the environment.

Key-words: Blast Furnace. Technology. Process . New equipment. Injection in tuyeres. Plastic injection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fotografia de um Forno do século XIV	16
Figura 2 – Fotografia e desenho esquemático de um Alto Forno	17
Figura 3- Desenvolvimentos na tecnologia de Alto Forno nas últimas décadas ..	18
Figura 4 - Crescimento no tamanho do Alto Forno	20
Figura 5 - Evolução significativa do consumo de combustível do Alto Forno ao longo dos anos.....	20
Figura 6 - Perfil do Alto Forno	21
Figura 7 - Fluxograma parcial de uma usina siderúrgica integrada a coque	22
Figura 8 – Esquema mostrando o funcionamento de um Alto Forno	23
Figura 9 - Representação dos dois tipos de sistema de carregamento : com “calha rotativa” ou com “armadura móvel”.....	25
Figura 10 – Corpo principal do Alto Forno	26
Figura 11 – Arranjo das ventaneiras no interior do forno e detalhes internos.....	28
Figura 12 –Sopro quente (ventaneira, resfriador, algaraviz, conexões e anel de vento)	29
Figura 13 – Zonas internas do Alto Forno	30
Figura 14 – Zona coesiva do Alto Forno	31
Figura 15 - Diagrama de equilíbrio Fe-C-O indicando a composição dos gases	35
Figura 16 - Diagrama esquemático indicando as transferências de elementos químicos na região inferior do forno	38
Figura 17 - Injeção de combustível auxiliar através de uma lança inserida pela ventaneira.....	42
Figura 18 - Duas tremonhas (paralelas) do Topo Sem Cone	45
Figura 19 - Benefícios do Topo Sem Cone versus sistemas do sistema com cones + armadura móvel	46
Figura 20 - Calha rotativa do Topo Sem Cone refrigerada com água	46
Figura 21 - Novo Topo Sem Cone com três tremonhas (patente pendente)	47
Figura 22 - Organização dos equipamentos de esgotamento	49
Figura 23 - Proteção ótima do furo de gusa	49
Figura 24 - Prática de fechamento do Furo de Gusa	49
Figura 25 - Comparação de perfuratrizes hidráulica vs pneumática	51

Figura 26 - Controle do martelo durante a abertura do furo de gusa	51
Figura 27 - Os sistema de refrigeração típico para Altos Fornos	52
Figura 28 - Sistemas de equipamentos e instrumentos de monitoramento do Alto Forno	54
Figura 29 - Áreas do processo do Alto Forno monitoradas / controladas por um Sistema Especialista	56
Figura 30 - O ciclo de tomada de decisão	56
Figura 31 - Controle da temperatura do gusa no Alto Forno	57
Figura 32 - Evolução dos principais parâmetros operacionais dos Altos Fornos da NKK	58
Figura 33 - Evolução da duração das campanhas dos Altos Fornos da NKK	59
Figura 34 - Desempenho operacional do Alto Forno No.4 de Fukuyama , antes e depois da substituição dos Staves da região da rampa	60
Figura 35 - Anos das construções dos equipamentos de PCI e evolução do PCR	61
Figura 36 - Efeitos do posicionamento da lança no fluxo do carvão pulverizado e eficiência da combustão	62
Figura 37 – Visualização da Lança Simples e da Lança dupla excêntrica.....	63
Figura 38 - Efeitos do teor de SiO ₂ no minério sinterizado na permeabilidade do Alto Forno	64
Figura 39 - Sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido com alta condutividade térmica	66
Figura 40 - Efeito da implantação de um sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido	66
Figura 41 - Diagrama estrutural esquemático do FIMPIT	68
Figura 42 - Evolução operacional antes e depois da implantação do FIMPIT (Fukuyama)	68
Figura 43 - Fluxograma do novo processo de dessiliciação do gusa	70
Figura 44 - Equipamentos para injeção experimental de plásticos num Alto Forno..	71
Figura 45 - A análise do comportamento dos resíduos plásticos no Alto Forno.....	73
Figura 46 - Fotografias em alta velocidade das partículas injetadas no Alto Forno..	76
Figura 47 - Análise do método das fotografia em alta velocidade.....	77
Figura 48 - Efeito do combustível injetado na Figura 46, na flutuação da área da chama, observado com fotografias em alta velocidade	77.

Figura 49 - Taxa de gaseificação de CO ₂ do char provenientes dos resíduos plásticos.....	79
Figura 50 - Concentração de hidrocarbonetos C ₁ -C ₄ e de H ₂ no interior do forno , durante a injeção de plásticos	80
Figura 51 - Concentração de hidrocarbonetos C ₁ -C ₄ no gás do topo do Alto Forno durante a injeção de plásticos.	81
Figura 52 - Teores de alcatrão no pó de Altos Fornos durante a injeção de plásticos e em operação normal	82
Figura 53 - O fluxo do gás gerado a partir da injeção de plástico no Alto Forno	83
Figura 54 - Alterações da composição de gás na zona de combustão durante a injeção de plásticos no modelo a quente da zona de combustão.	84
Figura 55 - Temperatura máxima no ponto do bico da ventaneira na zona de combustão , durante a injeção de plásticos.	85
Figura 56 - Alteração na concentração de O ₂ na zona de combustão , durante a injeção de plásticos nos Altos Fornos (processo industrial)	86
Figura 57 - Efeito do diâmetro partícula dos plásticos eficiência da gaseificação e da combustão	87
Figura 58 - Comportamento da gaseificação e combustão dos resíduos plásticos na zona de combustão	89
Figura 59 - Estimativa da taxa máxima injeção de plásticos cálculo baseado na geração de resíduo não queimados (char) e pela reação de solution loss	90
Figura 60 - Sistema de reciclagem dos resíduos plásticos em Alto Forno.	91
Figura 61 - Linha para preparação de resíduos plásticos recebidos , tanto na forma de garrafas como de filmes, transformando-a em grãos no tamanho apropriado para ser injetado no Alto Forno.	92
Figura 62 - Esquema da injeção da mistura de ar mais grãos de resíduos plásticos no Alto Forno	93
Figura 63 - Fluxo resumido da usina APR da NKK ,	94
Figura 64 - Vista geral da usina APR da NKK	95
Figura 65 - Unidade de fusão e descloretação	96
Figura 66 - Unidade de tratamento para neutralização	96
Figura 67 - Evolução da quantidade anual de resíduos plásticos injetados nos Altos Fornos da NKK	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fenômenos que ocorrem na operação com baixo "coke rate"	43
Tabela 2 - Condições experimentais da injeção de resíduos plásticos num Alto Forno.....	72
Tabela 3 - Condições experimentais de injeção de resíduos plásticos no modelo a quente da zona de combustão	75

SUMÁRIO

0 INTRODUÇÃO	14
1 REVISÃO DE LITERATURA	16
1.1 Histórico das Tecnologias implantadas no Alto Forno ao longo do tempo.	16
1.2 Produtividade e economia de combustível no Alto Forno	19
1.3 Projeto (Perfil) do Alto Forno	21
1.4 Descrição do Equipamento Alto Forno	23
1.5 Descrição das Zonas Internas do Alto Forno	29
1.6 Principais Reações no Interior do Alto Forno	32
1.6.1 Zona de Combustão	32
1.6.2 Reações de Redução.....	34
1.6.3 Reações de Incorporação dos Elementos de Liga.....	38
1.6.4 Mecanismos de Transferência do silício	38
1.6.5 Transferência de Outros Elementos para o Gusa	40
1.7 Injeção auxiliar de combustível no Alto Forno	40
1.7.1 Injeção de Carvão Pulverizado no Alto Forno	44
2 DESENVOLVIMENTO	45
2.1 EXPERIÊNCIA DA PAUL WURTH	45
2.1.1 Equipamento para o Topo do Forno	45
2.1.1.1 Topo Sem Cone	45
2.1.1.2 Topo Sem Cone com três tremonhas	47
2.1.2 Esgotamento do Cadinho	48
2.1.3 Duração de Campanha	52
2.1.4 Engenharia do Conhecimento	53

2.2 EXPERIÊNCIA DA NKK	57
2.2.1 Desenvolvimento de tecnologias na década de 1990	58
2.2.2 Injeção de Carvão Pulverizado no Alto Forno	61
2.2.2.1 Operação com elevadas taxas de injeção	61
2.2.2.2 Injeção de carvão pulverizado com elevada combustibilidade	62
2.2.2.3 Propriedades otimizadas do Sínter para a operação com elevadas taxas de PCI	63
2.2.3 Sistema de refrigeração	65
2.2.3.1 Desenvolvimento de um sistema altamente resistente	65
2.2.4 Qualidade do Ferro Gusa	67
2.2.4.1 Tecnologia de produção de gusa com baixo teor de silício	67
2.2.4.2 Desenvolvimento da tecnologia FIMPIT e redução do teor de silício contido no gusa	67
2.2.4.3 Elevação do tratamento de dessiliciação no nível das casas de corrida	69

2.3 INJEÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS APLICADOS EM ALTOS FORNOS

.....	71
2.3.1 Teste e experimentos	71
2.3.1.1 Teste industrial de injeção de plásticos no Alto Forno	71
2.3.1.2 Experimentos com modelo a quente da Zona de Combustão	74
2.3.2 Resíduos plásticos	75
2.3.2.1 Observação direta dos resíduos injetados na zona de combustão	75
2.3.2.2 Reatividade dos resíduos não queimados (Char) dos Plásticos	78
2.3.3 Fenômenos	80
2.3.3.1 Fenômenos internos do Alto Forno durante a Injeção de Plásticos ...	80
2.3.3.2 Influência do tamanho do grão dos plásticos nos Fenômenos internos do Alto Forno	83
2.3.3.3 Alteração dos fenômenos da zona de combustão pela injeção de plásticos	84
2.3.4 Gaseificação e Combustão	86

2.3.4.1 Comportamento da Gaseificação e da Combustão dos Plásticos na zona de combustão	86
2.3.4.2 Eficiência da Gaseificação e Combustão dos Plásticos	87
2.3.4.3 Mecanismos de Gaseificação e de Combustão dos plásticos	88
2.3.5 Estimativa da taxa máxima de injeção de plásticos	90
2.3.6 Processo de reciclagem comercial de resíduos plásticos para o sistema do Alto Forno	91
Características básicas da usina da NKK	95

CONCLUSÕES	99
-------------------------	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
---	------------

INTRODUÇÃO

O processo de Alto Forno domina o cenário mundial de produção de ferro gusa líquido para a produção de aço. Este predomínio tem se mantido, ao longo dos anos, principalmente devido aos contínuos desenvolvimentos ocorridos, especialmente a partir da década de 70, no projeto e na tecnologia operacional e de manutenção.

Estes desenvolvimentos levaram a aumentos significativos de produtividade, operação contínua por longo tempo, acentuada redução da taxa de combustível ou “fuel rate” e ao uso de outros redutores tais como o gás natural e o carvão pulverizado, injetados pelas ventaneiras. Entretanto, existem algumas desvantagens no processo de Alto Forno, principalmente centradas na necessidade de unidades suplementares de preparação de matérias primas, como a coqueria e a sinterização, que implicam em elevados investimentos adicionais, além de alguns problemas ambientais.

Isto abriu espaço para a pesquisa e desenvolvimento de processos alternativos denominados genericamente de “fusão redutora”. Apesar disto, devido à sua elevada eficiência energética, capacidade de produção, evolução tecnológica contínua e flexibilidade operacional, o Alto Forno entra neste novo século mais competitivo que nunca e novas unidades estão sendo construídas no Brasil e no mundo.

Diante deste contexto mundial o objetivo principal deste trabalho, portanto, é apresentar o estado da arte de algumas tecnologias que foram inseridas recentemente no Alto Forno, atendendo aos pré-requisitos descritos, levando em conta principalmente:

- a elevada produtividade,
- baixo consumo do combustível coque
- operação ambientalmente correta.

O caso particular de injeção de materiais nas ventaneiras foi aprofundado.

Metodologicamente, este trabalho está organizado em quatro capítulos. No primeiro, será apresentada a revisão de literatura, visando à apresentação breve da história do Alto Forno, para em seguida, descrevê-lo em seu corpo principal e equipamentos periféricos. Na sequência, ainda no mesmo capítulo, serão apresentadas suas zonas internas, as principais reações que ocorrem em seu interior, encerrando com uma análise sucinta da injeção auxiliar de combustível em sua região inferior.

No segundo capítulo, será aprofundada mais especificamente, a evolução tecnológica do Alto Forno sob a ótica de um fornecedor tradicional de equipamentos, a Empresa Paul Wurth, que se tornou uma referência mundial, no que tange a atender as necessidades de seus clientes. Alguns equipamentos periféricos e alguns assuntos relacionados a operação do Alto Forno serão abordados.

No terceiro capítulo, também será aprofundada, a evolução tecnológica do Alto Forno, porém nesse momento sob a ótica de um produtor em grande escala de aço, a Empresa Japonesa NKK. Vários assuntos relacionados com a evolução do desempenho operacional dos Altos Fornos de suas usinas, serão abordados, com destaque para a injeção de carvão pulverizado e para a qualidade do gusa produzido.

No quarto e último capítulo, um caso particular e bem interessante, no contexto atual de nossa sociedade será aprofundado: a experiência de injeção de resíduos plásticos na região das ventaneiras dos Altos Fornos, tanto teoricamente, como nos aspectos práticos de operação em grande escala. O que atualmente já é amplamente utilizado, com grande sucesso, tanto na Europa como na Ásia.

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Histórico das Tecnologias implantadas no Alto Forno ao longo do tempo

A idade do ferro foi posterior às idades da pedra e do bronze e possivelmente começou a cerca de 1000 anos a.C., embora artefatos de ferro mais antigos já foram encontrados, provavelmente advindos de meteoritos. No ocidente, as forjas catalãs, que dominaram a produção de ferro até o século XIV, consistiam em um tipo de lareira feita de pedra onde o minério de ferro e carvão vegetal (e lenha) eram carregados usando pás e cestos. Ocorria então um acendimento do fogo e uma insuflação de ar por foles. Esta operação culminava, após 6 a 7 horas, na produção de cerca de 100 kg de ferro, para uma carga típica de 320 kg de minério e 450 kg de carvão. O ferro era retirado, com consistência pastosa, pela parte inferior, através de um orifício que era fechado com terra e pedras.

No século XIV apareceram os primeiros fornos de cuba, construídos em alvenaria e com a forma de dois troncos de cone justapostos pela base, com uma coluna de carga de 2 m ou mais de altura, conforme mostra a fotografia da **Figura 1**.



Figura 1 – Fotografia de um Forno do século XIV

A partir do século XVI, a força hidráulica começou a ser usada para o acionamento dos foles por meio de uma roda d'água e o aumento da capacidade de sopragem de ar resultou, pela primeira vez, na elevação da temperatura e obtenção do ferro e da escória em estado líquido, ou invés de uma massa pastosa. Em 1709, Abraham Darby desenvolveu um Alto Forno que operava com coque ao invés de carvão vegetal, conforme mostra a fotografia e o desenho esquemático da **Figura 2**.

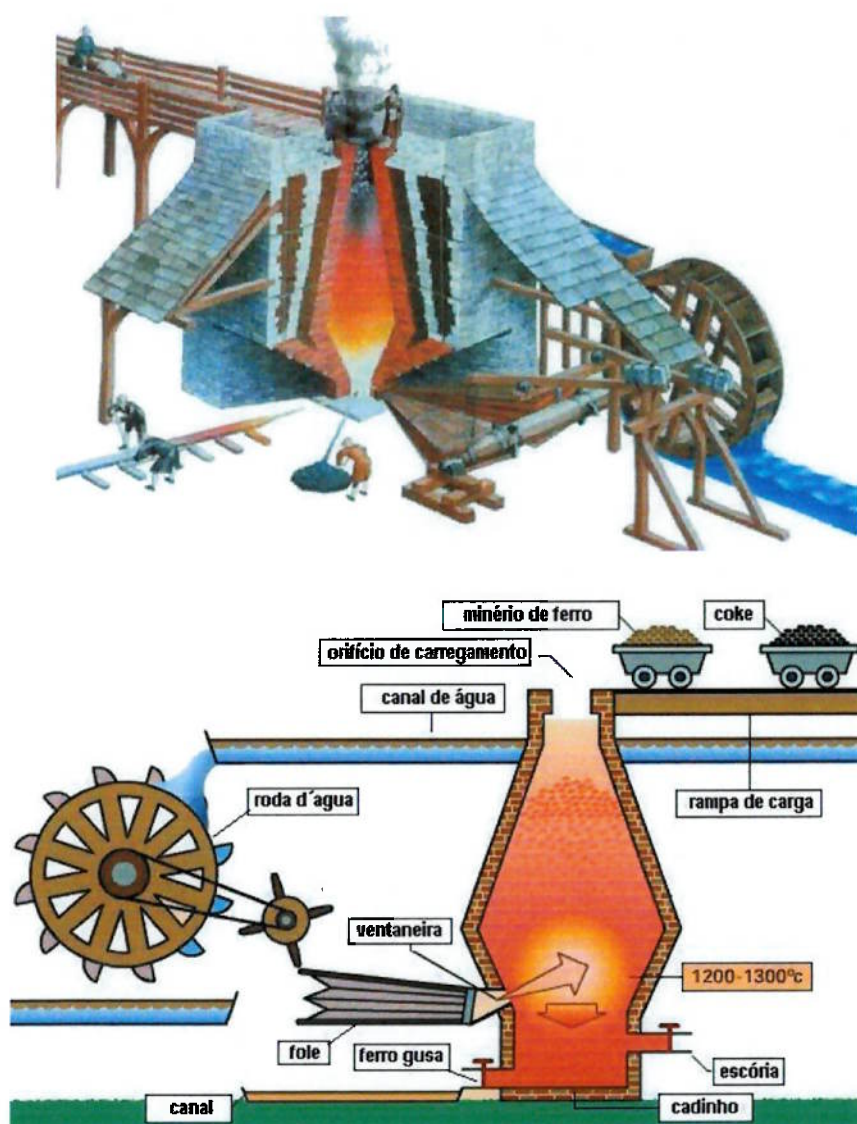


Figura 2 – Fotografia e desenho esquemático de um Alto Forno

Ao longo da história, a evolução da operação e do projeto do Alto Forno foram avalistas da eficiência do processo(custo) , onde produtividade e o combustível coque destacaram como os principais componentes.

Em anos mais recentes, como a siderurgia tem-se concentrado , em menos porém unidades maiores, a duração da campanha e a recuperação dos investimentos têm elevado significativamente como componente do custo do produto.

O notável ganho em eficiência operacional, tanto consumo de combustível como em elevação da produtividade, só foi possível devido aos contínuos avanços tecnológicos na operação e manutenção dos Altos Fornos , como resumido na **Figura 3 .**

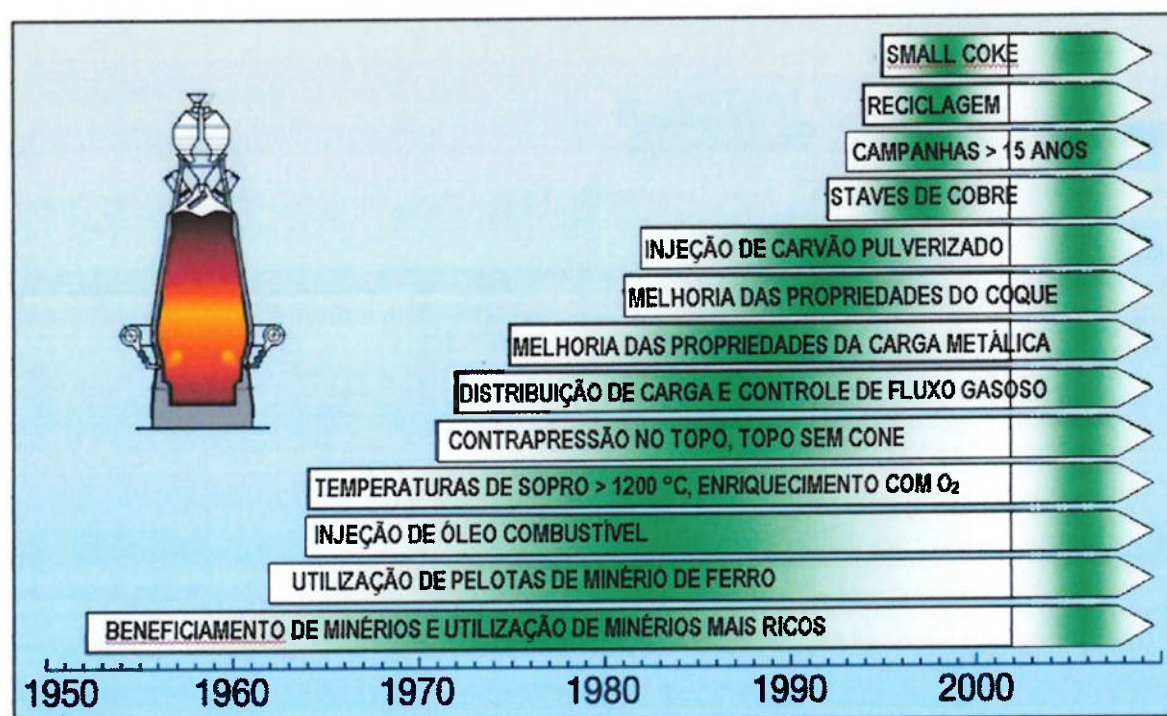


Figura 3 – Desenvolvimentos na tecnologia de Alto Forno nas últimas décadas

1.2 Produtividade e economia de combustível no Alto Forno

Essas duas facetas do Alto Forno prática estão interligados a um ponto que é difícil discuti-los separadamente.

A melhoria da produtividade está relacionada a:

- Um aumento da taxa de queima de combustível ou melhor rendimento térmico
- A redução na quantidade de combustível necessária para produzir uma tonelada de gusa

O fator mais importante determinar o ritmo de combustível pode ser queimado é o tamanho do Alto Forno . A área da seção transversal do cadinho para definir o esgotamento diário deve ser suficiente para permitir a passagem dos gases através da zona de combustão , contra os líquidos descendente, na "zona de amolecimento" do Alto Forno.

Uma combinação de estudos teóricos e análise estatística de Altos Fornos, de cadinhos com diâmetros de até 9,0 m , na década de 1950, por O.R.RICE, sugeriu uma taxa de queima uma coque (combustível) de 30 - 31 t/m² cadinho área / dia. Durante o período 1970 – 2000 , a taxa de queima de combustível foi influenciada pelo aumento da temperatura e pressão de sopro , bem como a introdução de carvão ou gás natural associado com a enriquecimento do ar soprado com injeção de oxigênio. Essas mudanças nas condições das ventaneiras em alguns Altos Fornos europeus com alta produtividade indicam taxas de queima de combustível 35 - 40 t/m² recuperador área / dia.

A **Figura 4** ilustra a alteração no tamanho dos Altos Fornos durante o século 20. O volume de trabalho (das ventaneiras até o nível de carregamento) multiplicou por quatro desde 1960; de 1200 a 4800 m³. No entanto a produtividade aumentou de 1500 para 12000 toneladas / dia.

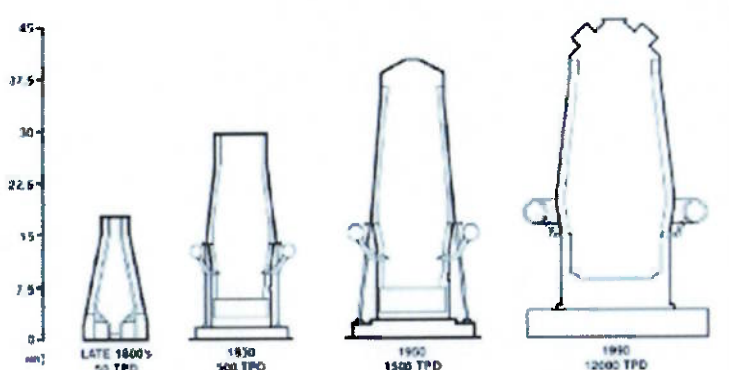


Figura 4 - Crescimento no tamanho do Alto Forno

O tamanho apenas, por si só representa 50% do aumento da produtividade. A atual eficiência do Alto Forno foi elevada por avanços em:

- Qualidade de matérias-primas (coque, sínter e pelotas)
- Preparação de carga e coque
- Projeto do Forno (perfil)
- Práticas operacionais e de novas tecnologias
- Plantas e equipamentos
- Sistemas de controle de processo

Estas medidas têm reduzido a quantidade de coque (combustível) necessária para produzir uma tonelada de gusa. As implementações cronológica são mostradas na

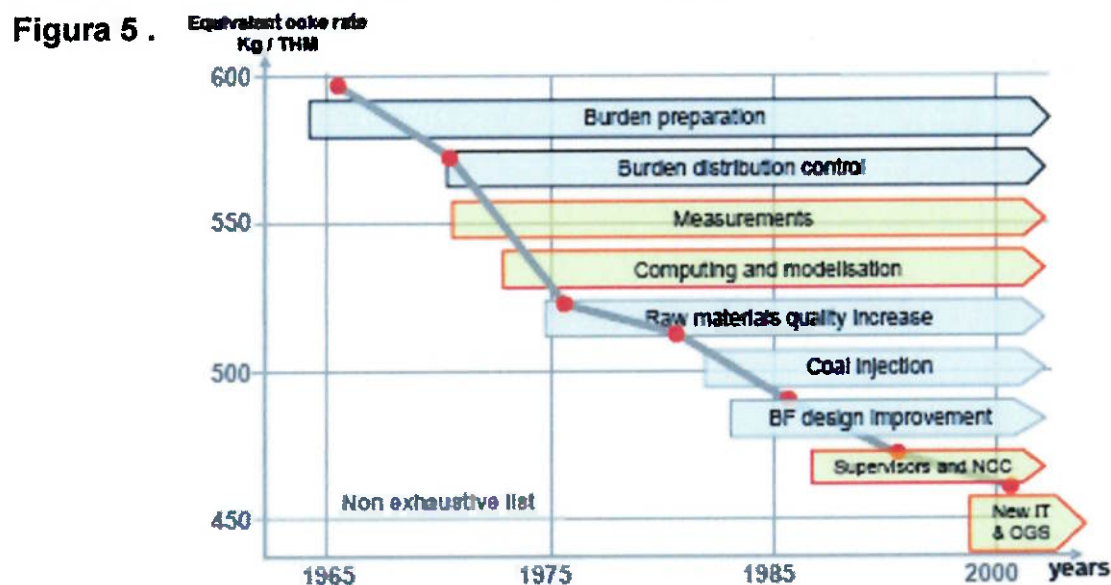


Figura 5 - Evolução significativa do consumo de combustível do Alto Forno ao longo dos anos

1.3 Projeto (Perfil) do Alto Forno

A maior parte dos perfis dos Altos Fornos modernos são baseados no conceito de forno auto sustentável. A produção diária objetivada e produtividade associadas a uma práticas siderúrgica particular geralmente definem o volume de trabalho do forno (volume das ventaneiras ao nível de carregamento). O verdadeiro perfil do forno (**Figura 6**) é desenvolvido a partir da base de dados de relações empíricas entre os diâmetros do cadinho , ventre e goela e as alturas de cada zona, que foram estabelecidas a partir de Altos Fornos de elevado desempenho . Estas relações são validadas por modelamentos físicos.

A otimização da produtividade e eficiência do processo são baseadas na operação estável, que é o produto de um perfil espacial adequado para a fusão e prevê o cadinho com capacidade para garantir que as funções de fusão e esgotamento devem ser harmonizadas.

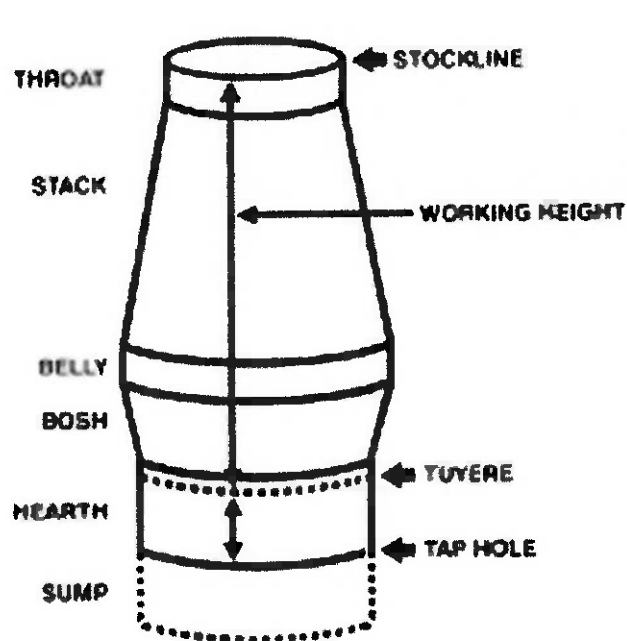


Figura 6 - Perfil do Alto Forno

O Alto Forno consiste em um sistema destinado a produzir ferro gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1500°C , com a qualidade e em quantidade necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes. Para isto, o Alto Forno utiliza como matérias primas básicas a carga metálica (sinter, pelotas, minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado, etc.).

Em uma usina siderúrgica integrada a coque, o sinter, produzido na Sinterização, tem como constituinte principal o minério de ferro, e o coque, produzido na Coqueria, é obtido através da pirólise do carvão mineral. Outros materiais podem ser utilizados, também carregados pelo topo (ilmenita , briquetes de resíduos, etc) ou injetados na região inferior do forno (finos de carvão mineral , finos de minérios, plásticos, etc). (O ar quente é soprado na região inferior do forno, gerando gases que ascendem em contra corrente com os sólidos carregados pelo topo).

A **Figura 7** mostra um fluxograma parcial de uma usina, até o Alto Forno, destacando as matérias primas básicas carregadas no Alto Forno e seus principais produtos.

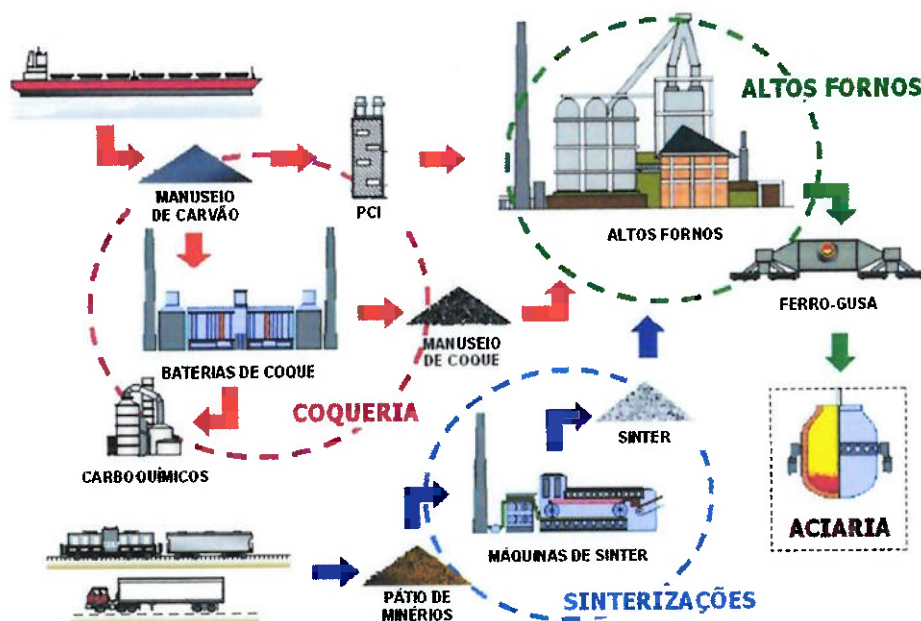


Figura 7 - Fluxograma parcial de uma usina siderúrgica integrada a coque

1.4 Descrição do Equipamento Alto Forno

O Alto Forno é considerado o reator mais complexo da metalurgia. No seu interior ocorrem centenas de reações e estão presentes os 3 estados da matéria: sólidos, líquidos e gases. Neste reator ocorrem grandes gradientes de temperatura, variando de mais de 2000 °C na zona em frente as ventaneiras, onde ocorre a combustão do coque, até cerca de 150 °C, na região superior onde os gases deixam o forno.

O Alto Forno é um equipamento que, contando com as matérias primas ferrosas preparadas (sinter e pelotas) ou não (minério granulado); com um combustível e fonte de gás redutor (coque ou carvão vegetal) e injeção auxiliares pelas ventaneiras (óleo combustível, alcatrão, carvão , gás natural) ou não, tem por objetivo produzir uma liga, no estado líquido, composta de ferro (90 ~ 95 %) e carbono (3 ~ 4,5 %) e mais alguns elementos de liga (silício, manganês, etc.), a uma temperatura em torno de 1500°C, liga esta denominada ferro gusa ou gusa . Para uma descrição seqüencial do processo de Alto Forno e da função de algumas partes que serão primordiais para o entendimento do funcionamento do equipamento, serão utilizadas as indicações numéricas da **Figura 8**.

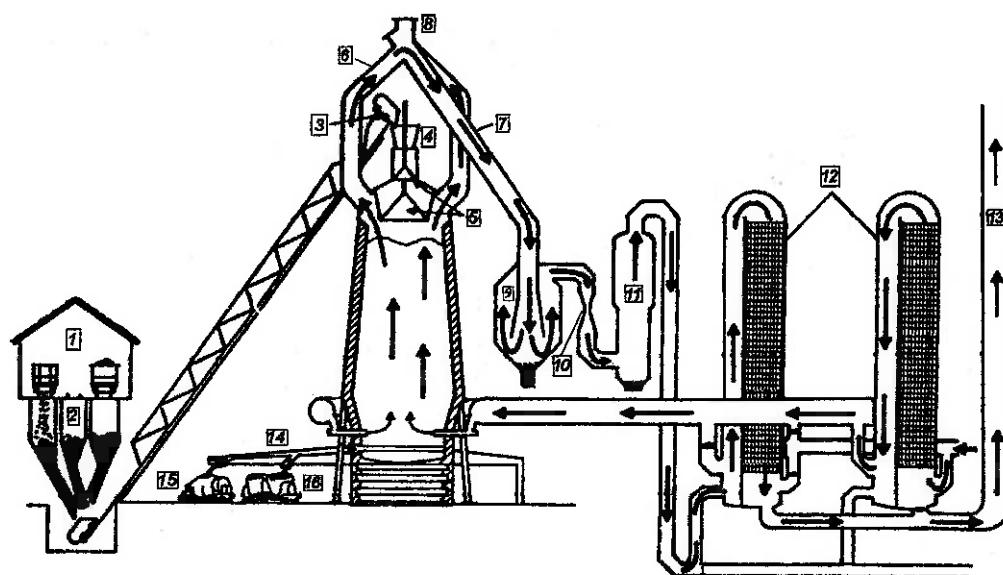


Figura 8 – Esquema mostrando o funcionamento de um Alto Forno

Partindo dos pátios de estocagem ou dos processos anteriores (Coqueria e Sinterização), as matérias primas são transferidas para a “casa de silos” (1) através de correias transportadoras. Cada tipo de material (sinter, coque, minério granulado, pelotas, fundentes, etc.), é carregado em silos separados (2) equipados com balanças. As várias matérias primas são pesadas de acordo com regras predeterminadas de modo a obter a composição química desejada do ferro gusa e da escória a partir das análises químicas de cada material. Os materiais da carga, após pesagem, são então descarregados sobre um carro “skip” (3) ou correia transportadora, que fazem o transporte dos materiais até uma tremonha de recebimento no topo do forno (4).

No topo do forno as matérias primas ferríferas (sinter, minério granulado, pelotas) são carregadas de modo a formar, no interior do forno, camadas separadas das de coque. Os materiais podem ser carregados para o interior do forno por meio de um sistema de dois estágios de cones (5), os quais são responsáveis pela selagem dos gases e pela distribuição circunferencial dos materiais na “goela” do forno. Estes fornos podem ter também um dispositivo denominado “armadura móvel”, que consiste de placas móveis cuja função é reduzir a seção da goela, permitindo o direcionamento dos materiais carregados para a região central. Outros fornos mais modernos podem ter um outro sistema de carregamento baseado em duas tremonhas que descarregam as matérias primas em uma “calha rotativa” que pode ter o ângulo de inclinação alterado, permitindo grande flexibilidade no direcionamento da carga no interior do forno.

Estes dois tipos de sistema de carregamento , podem ser observados pela **Figura 9** .

Também no topo do forno, existem quatro “up-takes” (6), através dos quais o gás quente e sujo com poeiras deixa o forno e flui para cima, para então serem direcionados para baixo por meio do “downcommer” (7). No extremo do topo do forno existem válvulas “bleeders” (8) cuja função é permitir a liberação do gás e proteger o topo no caso de uma súbita elevação de pressão do gás, decorrente de eventuais problemas operacionais com o processo. Toda esta região tem a

estrutura em chapas de aço protegidas com refratário interno, juntas de expansão para absorver as variações de temperatura e pressão dos gases e vedações á base de silicone para evitar vazamentos de gases no ambiente. Em média, estes componentes são projetados para operar com temperatura na ordem de 350 °C. Acima disto, há a necessidade de se resfriar imediatamente os gases através da injeção de água por meio de “sprays” instalados sobre a carga.

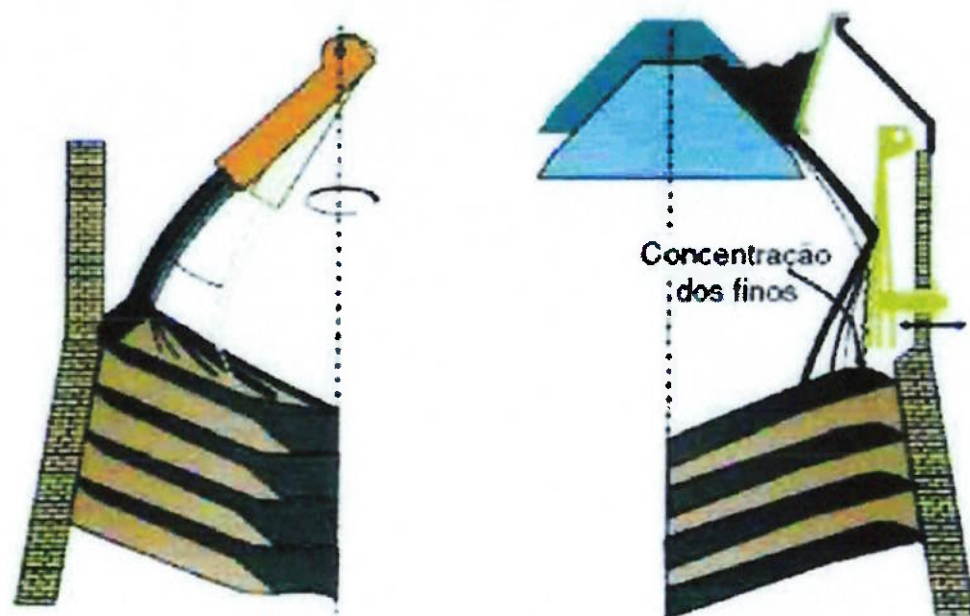


Figura 9 - Representação dos dois tipos de sistema de carregamento : com “calha rotativa” ou com “armadura móvel”

O gás desce pelo “downcommer” até o coletor de pó (9), onde as partículas de pó mais grosseiras se depositam, acumulam e são descarregadas sobre um vagão ferroviário. O gás então flui para a lavagem em um equipamento tipo “venturi” (10), onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama. O estágio final de tratamento do gás consiste da passagem pelo desumidificador (11) cuja função é reduzir o teor de umidade do gás.

Após a limpeza, parte do gás gerado é direcionada para os regeneradores (12). Normalmente os fornos são equipados com 3 ou 4 regeneradores com formato cilíndrico. Os gases são queimados na região inferior do regenerador que está na

fase combustão, atingem o domo e, ao descer, transferem calor para um empilhamento de tijolos refratários presente no interior do regenerador. Os produtos da combustão deixam os regeneradores e são encaminhados a uma chaminé compartilhada por todos (13). O ar, proveniente de turbo sopradores, é aquecido após passar pelo regenerador que está em fase de sopro, e injetado pelas ventaneiras.

Na parte inferior do forno o gusa e a escória produzidos são separados por diferença de densidade no canal principal (14). O gusa é coletado em carros torpedos (15) e destinado a Aciaria. A escória é drenada em potes (16) ou transformada em um material granulado por meio de jato de água em alta pressão e colocada para venda.

- **Corpo Principal do Alto Forno :** O corpo principal do Alto Forno é composto da goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, assim definidos em função da geometria e da função de cada região, conforme mostra a **Figura 10**.

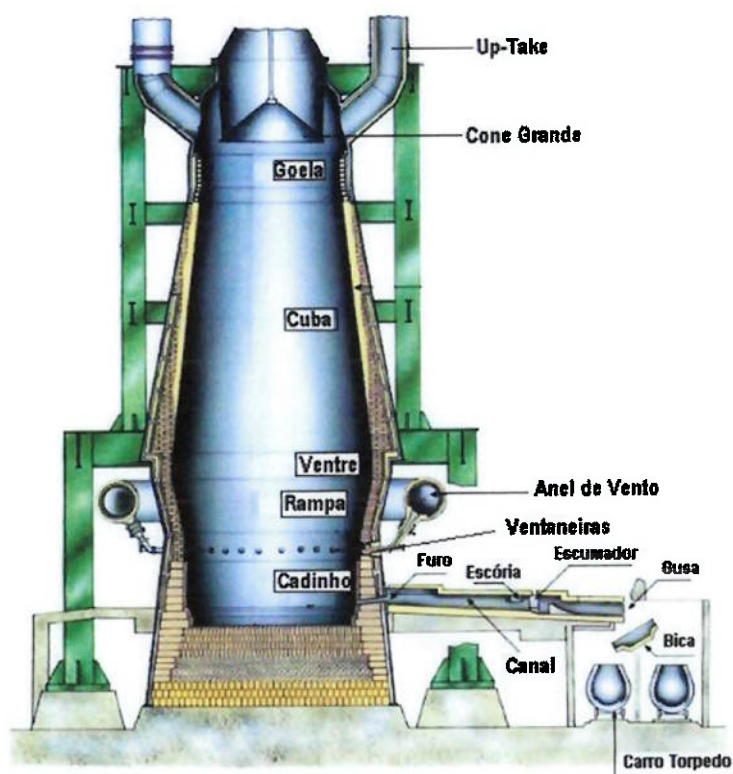


Figura 10 – Corpo principal do Alto Forno

- **Goela:** Parte cilíndrica superior do onde é feito o carregamento do alto forno. Nesta região, ficam posicionados os equipamentos de distribuição da carga, que serão detalhados posteriormente, e diversos sensores que medem o nível da carga, o perfil da carga, a temperatura e a composição dos gases produzidos, etc. O nível normal da carga, medido por meio de um sonda mecânica ou radar, fica em torno de 1,0 m abaixo de um referencial denominado “stockline”. Sempre que o nível da carga no ponto de medição atinge este valor predefinido uma nova batelada de carga é carregada no interior do forno.
 - **Cuba:** Compreende a maior parte volumétrica do Alto Forno, sendo de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte inferior. Este formato se deve em parte à necessidade de compensar o aumento de volume da carga devido a elevação da temperatura e em parte para possibilitar uma descida de carga suave, sem a agregação de cascos de material semi-fundido nas paredes.
 - **Ventre:** Parte cilíndrica de união entre a cuba e a rampa. Devido à intensa oscilação de temperatura em função da variação de posição da raiz da zona coesiva, é uma das partes mais solicitadas do forno.
 - **Rampa:** Região de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na parte superior, sendo que este formato ajuda a sustentação da carga e o gotejamento de gusa e escória para o cadinho através dos interstícios das partículas de coque;
 - **Cadinho:** Região cilíndrica que compõe a parte inferior do Alto Forno e que tem como uma de suas finalidades armazenar por tempo controlado o gusa e a escória produzidos. Na parte inferior do cadinho ficam as regiões denominadas Furos de Gusa, onde são feitas perfurações periódicas para a drenagem do gusa e da escória. . Na parte superior do cadinho ficam posicionadas as ventaneiras, onde é feita a injeção do ar soprado e de combustíveis auxiliares.
- As ventaneiras, conforme pode ser observado no arranjo da **Figura 11** , ficam posicionadas na parte superior do cadinho, um pouco antes da conexão com a rampa. O número de ventaneiras aumenta com o tamanho dos fornos, podendo alcançar mais de 40 nos grandes Altos Fornos .

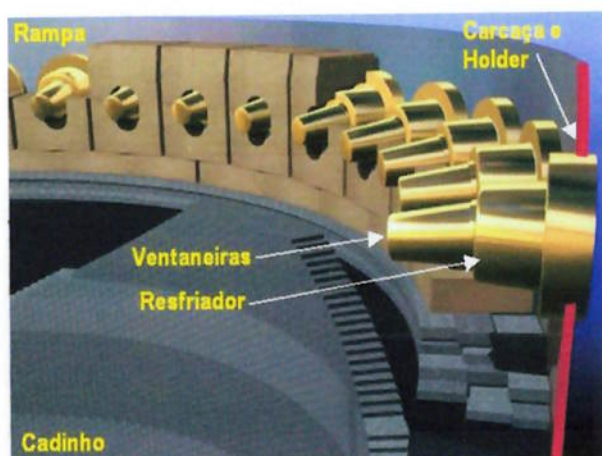


Figura 11 – Arranjo das ventaneiras no interior do forno e detalhes internos.

O ar quente é introduzido nas ventaneiras, para a combustão do coque, através de um tubo de ligação denominado de algaraviz. O algaraviz é uma peça de aço revestida internamente com refratário cerâmico. Na extremidade do algaraviz, oposta ao acoplamento com a ventaneira, fica uma espécie de visor que, através de vidros de alta resistência a temperatura e pressão, permite visualização da zona de combustão do Alto Forno e também diversos aspectos operacionais muito relevantes para o processo.

Como exemplo, pode-se citar a observação de passagem de cascos desgarrados das paredes ou de semi-fundidos, o estado da combustão das injeções auxiliares, a presença de escória retida e, principalmente a avaliação periódica do estado térmico do forno pelo simples brilho da zona de combustão, quando observado por um operador experiente.

Pelos algaravizes também são inseridas as lanças que permitem as injeções de combustíveis auxiliares na ventaneira. Os tubos superiores, que conectam o algaraviz ao anel de vento também são revestidos com refratário para proteger o aço e minimizar a perdas de calor, conforme arranjo que pode ser observado na **Figura 12**.

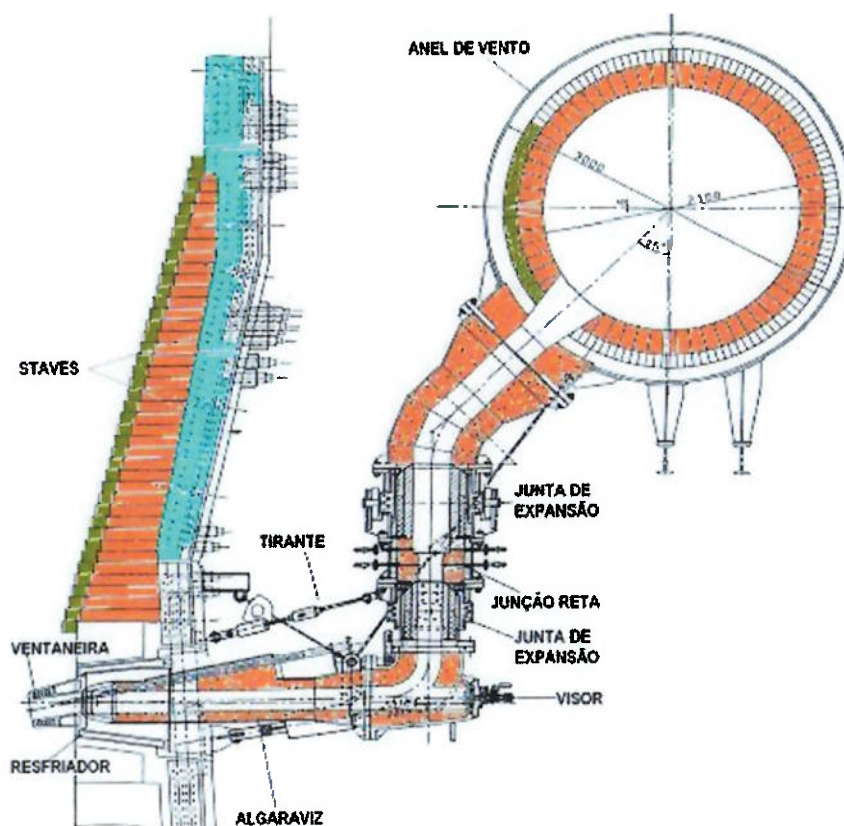


Figura 12 –Sopro quente (ventaneira, resfriador, algaraviz, conexões e anel de vento)

1.5 Descrição das Zonas Internas do Alto Forno

Com base em estudos de dissecação de Altos Fornos realizados na década de 70 no Japão, onde Altos Fornos em operação foram congelados, além de sondagens com fornos em operação e diversos outros estudos em vários países, cinco zonas internas principais nos altos fornos foram definidas, conforme mostra esquematicamente a **Figura 13**.

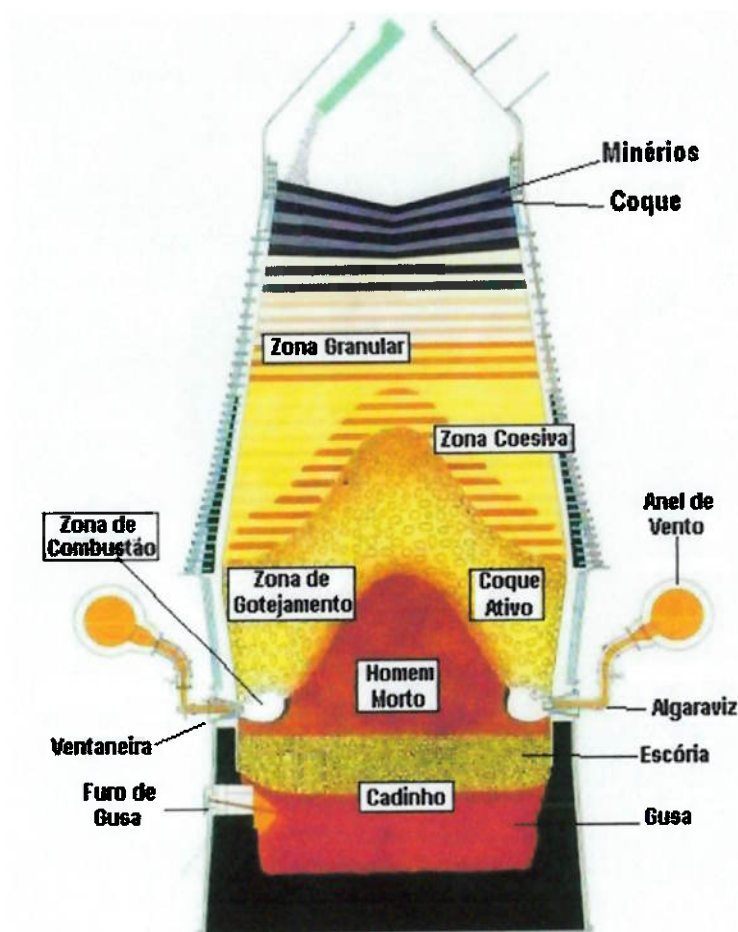


Figura 13 – Zonas internas do Alto Forno

As características principais de cada zona interna do Alto Forno são descritas a seguir.

1 - Zona Granular: Nesta zona o minério e o coque mantêm a sua configuração em camadas tais como foram carregados, ou seja, camadas alternadas de coque e de minérios. Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos), portanto a redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido.

2 - Zona Coesiva: É constituída de camadas de coque e camadas coesivas alternadas. As camadas coesivas são formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de coque. A **Figura 14** mostra esquematicamente as principais características da zona coesiva.

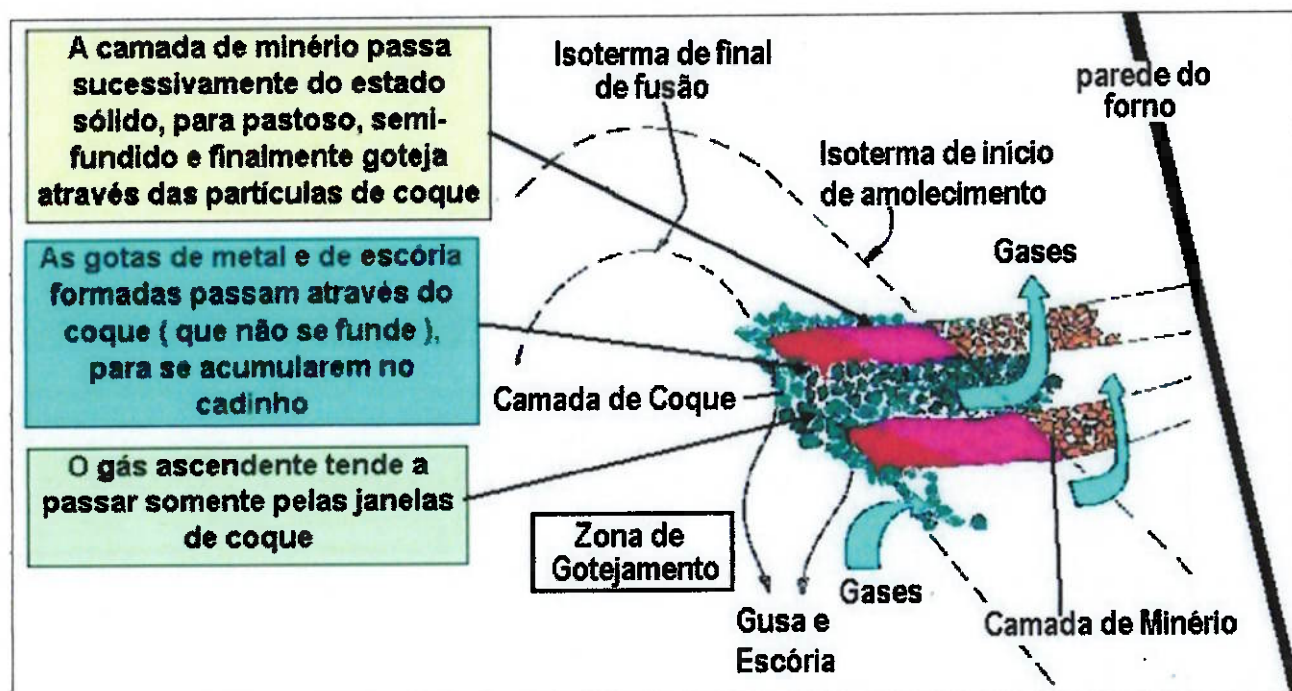


Figura 14 – Zona coesiva do Alto Forno

Observando a **Figura 14**, notamos que a disposição da carga em camada alternadas de coque e minérios ocorre até a zona coesiva. Nas temperaturas reinantes a partir desta região somente o coque consegue se manter em estado sólido. Portanto, na parte inferior do forno, ou seja, no cadinho e em parte da rampa, a carga sólida é composta somente de coque e ele será consumido por queima na zona de combustão ou tendo seu carbono absorvido pelo metal líquido. Esta porção de coque se divide em duas zonas: a “zona de coque ativo” que compreende a porção de coque que rola em direção às ventaneiras para ser queimado e a “zona de coque inativo”, também denominada de “homem morto”, cujo coque não rola em direção às ventaneiras e é consumido basicamente pela incorporação de carbono ao gusa.

Esta porção de coque tem sobre si grande parte do peso de toda a coluna de carga do Alto Forno e, dependendo da relação de forças entre o peso da carga e o empuxo exercido pelo gusa, escória e ar soprado, pode ser ou não apoiada no fundo do cadinho. O gusa e escória líquidos ficam depositados no cadinho ocupando os espaços intersticiais entre as partículas desta porção de coque.

A zona coesiva do Alto Forno situa-se na faixa de temperatura compreendida entre o início de amolecimento e a fusão da carga metálica. O seu perfil depende da distribuição de fluxo gasoso no interior do Alto Forno, que por sua vez, depende da relação minério/coque ao longo do diâmetro do forno.

A atuação na relação minério/coque ao longo do diâmetro do forno constitui importante parâmetro operacional do Alto Forno, denominado de “distribuição da carga” .

3 - Zona de Gotejamento: Esta região contém coque na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o gusa e a escória. Esta zona costuma ser dividida em duas sub-zonas: a região de coque ativo e o “homem morto”. Durante a descida das gotas de gusa para o cadinho acontecem importantes reações que incorporam os elementos de liga ao gusa.

4 - Zona de Combustão: É uma região parcialmente vazia em frente as ventaneiras, devido à elevada energia cinética do sopro de ar quente. À medida que as partículas de coque circulam, vão sendo queimadas, gerando o gás redutor e energia.

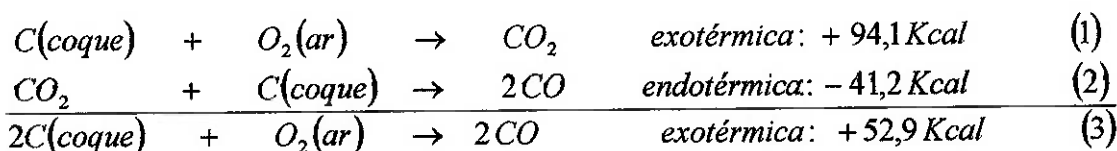
5 - Cadinho: É preenchido com coque granulado, por cujos interstícios se depositam o gusa e escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade. No cadinho ainda ocorrem importantes reações entre as fases metálicas e escorificada, tais como a de dessulfuração do gusa.

1.6 Principais Reações no Interior do Alto Forno

1.6.1 Zona de Combustão

O ar aquecido pelos regeneradores é injetado nas ventaneiras a uma velocidade que varia de 180 a 280 m/s. Decorrente desta alta velocidade, o coque em frente das ventaneiras é empurrado formando uma cavidade, denominada “zona de combustão”, onde o mesmo circula em movimentos rápidos ao mesmo tempo em que é queimado pelo oxigênio do ar e vai diminuindo de tamanho.

As reações do coque na frente das ventaneiras, onde ele é queimado pelo ar injetado gerando temperaturas de chama da ordem de 2000 a 2400 °C, ocorrem como mostrado a seguir:



Inicialmente ocorre a oxidação do carbono do coque pelo oxigênio do ar, conforme a reação (1), gerando grande quantidade de calor. Como o CO_2 é instável na presença de carbono acima de 1000 °C, e existe e carbono em excesso (coque presente), a reação (2), conhecida como reação de Bourdoudard, se desenvolve rapidamente. Desta forma, para efeito termodinâmico tudo se passa como se somente ocorresse a reação (3), ou seja, que todo o oxigênio do ar injetado no Alto Forno queima o carbono do coque produzindo CO. O ar soprado contém ainda umidade cuja decomposição se dará segundo a reação:



A equação (4) explica o efeito refrigerante sobre a temperatura de chama proporcionado pela umidade do ar soprado. Na operação do Alto Forno, costuma-se injetar certa quantidade de vapor junto com o ar de modo a manter constante a umidade do ar e exercer melhor controle sobre a temperatura de chama.

Pelas reações acima, a composição aproximada dos gases produzidos pela combustão nas ventaneiras sem injeções auxiliares (desprezando-se a parte proveniente da umidade, o que não afetará muito o percentual) pode ser obtida considerando que cada molécula de O_2 do ar gera 2 moléculas de CO. Portanto, em termos de volume temos que :

Volume total dos gases = Volume de nitrogênio + 2 x Volume de oxigênio.

$$\% N_2 = \frac{79}{79 + (21 \cdot 2)} \times 100 = 65,3\%$$

$$\% \text{ CO} = \frac{21 \times 2}{79 + (21 \times 2)} \times 100 = 34,7\%$$

Assim a combustão nas ventaneiras gera um gás com cerca de 35% de CO na temperatura de chama, ou seja, um gás com alto poder de redução que se dirigirá para as partes superiores do Alto Forno para reagir com óxidos de ferro, retirando-lhes o oxigênio combinado e produzindo o ferro livre. A injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras pode alterar significativamente a composição do gás gerado, principalmente com relação à presença de hidrogênio.

1.6.2 Reações de Redução.

O regime de trocas térmicas no Alto Forno aliado às condições termodinâmicas e cinéticas impostas pela reação de Bourdoudard permite a divisão do forno em duas zonas. Estas zonas possuem características tão distintas que é possível tratá-las como reatores diferentes, a saber:

- a) Zona de Preparação: onde o carbono do coque praticamente não reage, constituindo um material inerte
- b) Zona de Elaboração: onde o carbono do coque reage com o CO₂ restituindo o poder redutor do gás através da reação de Bourdoudard

A existência de uma temperatura crítica do ponto de vista cinético, abaixo da qual o carbono do coque não reage com os gases é importante pelo fato de o coque ser o maior componente de custo do gusa. É interessante, portanto, transferir o máximo possível de oxigênio da carga ferrífera aos gases antes que o carbono passe a ser gaseificado, ou seja, na zona de preparação.

A delimitação entre as zonas de preparação e elaboração pode ser melhor entendida observando-se a **Figura 15** que mostra, em um diagrama de equilíbrio "Fe-C-O", as variações típicas das condições internas do Alto Forno, na forma de uma linha pontilhada, desde a zona de combustão até o topo do forno.

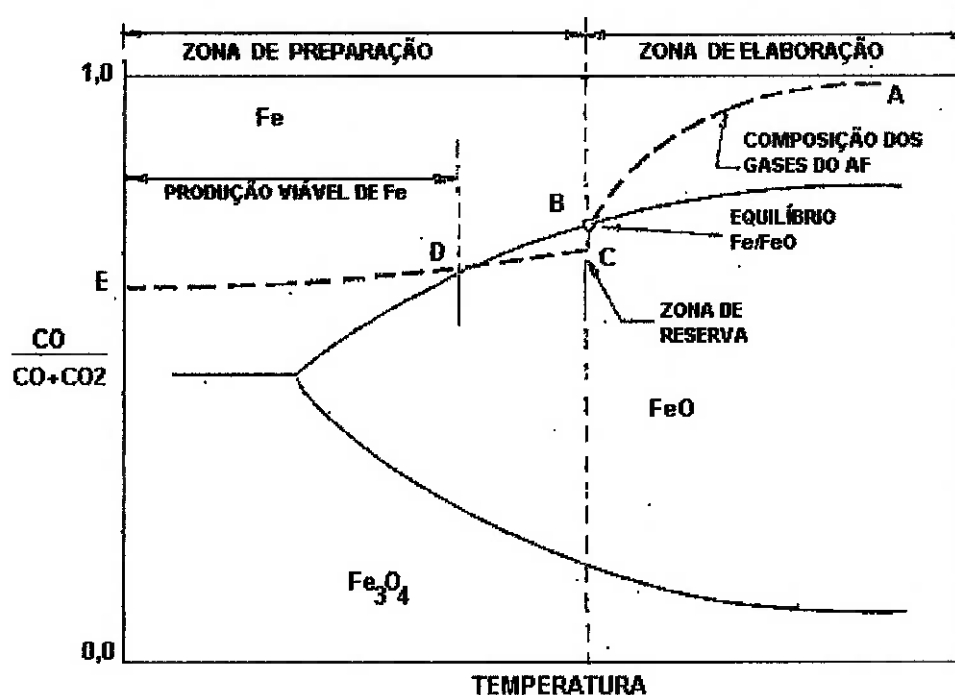


Figura 15 - Diagrama de equilíbrio Fe-C-O indicando a composição dos gases

O ponto "A" na figura corresponde ao gás que sai da zona de combustão, com alto potencial redutor. A medida que as reações de redução se processam o potencial redutor do gás cai, bem como a temperatura, e o gás que entra na zona de preparação, cuja composição é representada pelo ponto "B", está localizado exatamente sobre a linha de equilíbrio "FeO-Fe", no caso de haver tempo suficiente para a redução completa dos óxidos de ferro para wustita na zona de preparação.

Existindo a zona de reserva térmica, onde a temperatura é constante, o gás, ao reduzir a carga ferrífera, atinge o ponto "C". Continuando sua ascendência no forno, o gás continuará a se resfriar a partir do ponto "C", estando ainda sobre o campo de estabilidade da wustita. Ao atingir o ponto "D" o gás volta a penetrar no campo de estabilidade do ferro e havendo condições cinéticas favoráveis, pode ser produzida também alguma quantidade de ferro. O ponto "E" fornece a composição dos gases de topo do forno.

A Zona de Preparação, na parte superior do forno, pode ser considerada como um reator em contra corrente que tem a finalidade de secagem, pré-aquecimento e pré-redução da carga pelos gases ascendentes.

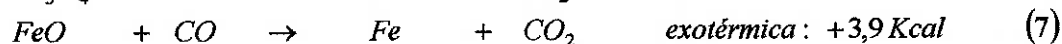
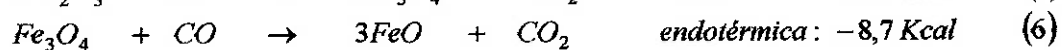
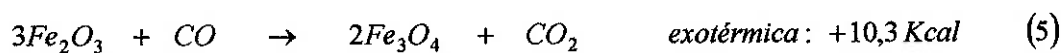
Outras reações que podem ocorrer na zona de preparação são a vaporização da água de hidratação, a reação de deposição do carbono ($2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$) e a reação de formação do gás de água ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$).

A evaporação da umidade da carga é feita de maneira violenta, pois o gradiente de temperatura nos sólidos é muito elevado com a temperatura superando os 100 °C em poucos minutos.

A Zona de Elaboração é um reator em contracorrente ainda mais complexo. Os gases provenientes da combustão do coque (essencialmente CO e N_2) deixam a zona de combustão em temperaturas elevadas e trocam calor com o gusa e a escória na zona de gotejamento. Prosseguindo o movimento ascendente, os gases penetram na zona de amolecimento e fusão onde há um forte gradiente térmico pois aí ocorre a fusão da carga ferrífera, boa parte da redução final do FeO a Fe e gaseificação do coque pela reação de Bourdoudard.

Na estreita faixa da zona granular que pertence a zona de elaboração, logo acima da zona coesiva, sucedem grande parte das reações redução da carga ferrífera e da gaseificação do coque, sendo portanto uma região de alta endotermicidade, com elevado gradiente de temperatura.

A redução da hematita- Fe_2O_3 a Fe é realizada em estágios, conforme as seguintes equações:

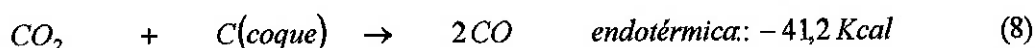


Observando o diagrama Fe-C-O na **Figura 15** nota-se que a redução da wustita (7) necessita de um elevado potencial de gás redutor. Este gás, após a redução da wustita, ascende no forno e reduz facilmente a magnetita e a hematita (6) e (5) devido ao baixo potencial redutor necessário a estas reações. Assim, a redução

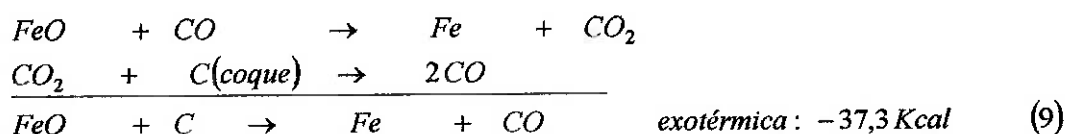
da wustita é de capital importância no forno, principalmente porque 67% do oxigênio contido na hematita estará presente sob a forma de wustita.

As equações (5), (6) e (7) são chamadas reações de redução indireta e o produto é o CO_2 . Globalmente a redução indireta é levemente exotérmica. Como o CO_2 representa o produto final da combustão do carbono, a utilização da energia química do carbono será mais completa quanto maior a quantidade de oxigênio removido pelas reações de redução indireta.

Entretanto, acima da temperatura crítica, na entrada da zona de elaboração, passa a ocorrer a gaseificação do coque. Assim, o CO_2 produzido pela redução indireta é rapidamente reduzido pelo carbono de acordo com a equação (2), conhecida como reação de Bourdouard ou "solution-loss".



Combinando as equações (3) e (4), tem-se:



A equação (9) é chamada reação de redução direta e é altamente endotérmica em contraste com a redução indireta e, além disto, consome e degrada o coque. A vantagem da redução direta é que ocorre um consumo menor de carbono para cada mol de oxigênio removido, porque o produto da reação é o CO, que pode realizar novas reações de redução.

Para minimizar as necessidades térmicas do Alto Forno é vantajoso que a redução indireta ocorra preferencialmente à redução direta, já que a primeira gera calor e a segunda consome calor. A introdução do hidrogênio, como um componente do combustível injetado, move as condições de equilíbrio entre as reações na direção da redução indireta.

Além da redução direta, outras reações que podem ocorrer na zona de elaboração são a redução direta dos óxidos das impurezas, dessulfuração do gusa, reação de

formação de gás d'água, combustão do carbono, redução da umidade do sopro, etc.

1.6.3 Reações de Incorporação dos Elementos de Liga.

A **Figura 16** mostra esquematicamente um diagrama com as principais transferências de elementos químicos entre o gusa, escória e o fluxo gasoso na região inferior do Alto Forno. Observa-se que a cinza do coque desempenha um papel fundamental para a incorporação do enxofre e do silício ao gusa.

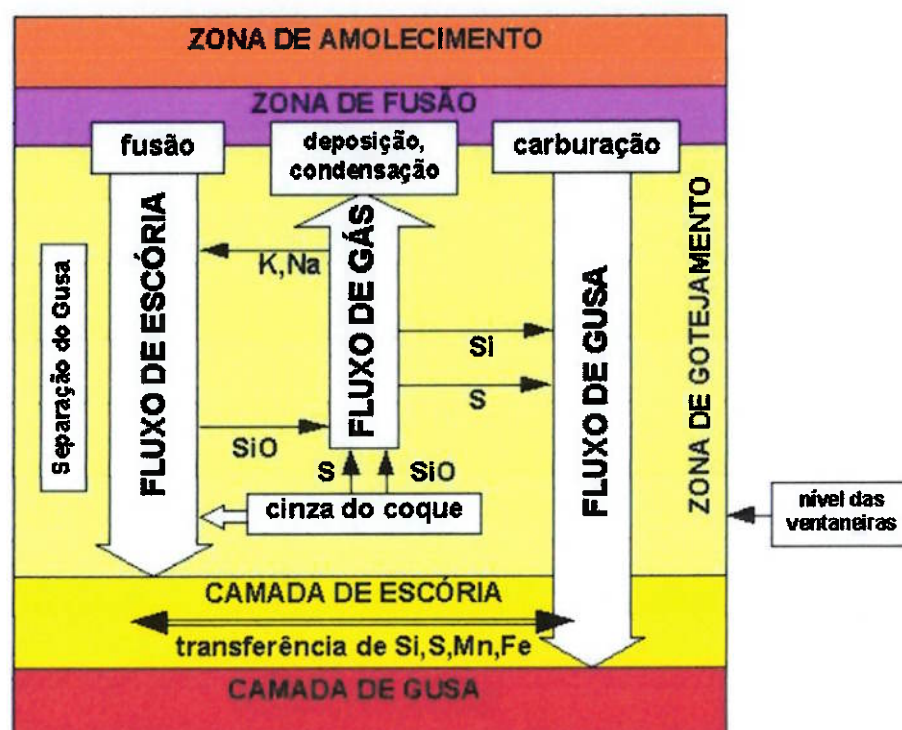


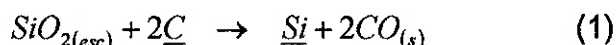
Figura 16 - Diagrama esquemático indicando as transferências de elementos químicos na região inferior do forno

1.6.4 Mecanismos de Transferência do silício

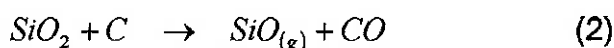
O silício é o elemento de liga mais importante do ferro gusa do ponto de vista do controle térmico do processo, pois variações de nível térmico afetam diretamente sua incorporação ao gusa.

As duas grandes fontes de SiO_2 no Alto Forno são ganga dos minérios e cinza do coque. As contribuições de cada fonte dependem dos tipos de minérios e de coque, bem como do "coke rate".

Dois mecanismos para a transferência do Si para o gusa podem ser considerados: diretamente da escória para o gusa através de reações metal-escória,

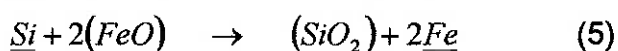
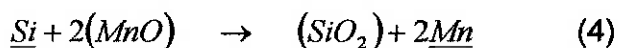


e indiretamente, onde o Si é transferido da escória ou da cinza do coque para a fase gasosa como SiO. O SiO então reage com o carbono do ferro gusa, incorporando o silício.



Estudos cinéticos das reações metal-escória, de vários autores, concluíram que a reação (1) é muito lenta, portanto, a transferência de silício via SiO, reações (2) e (3), é a principal rota de transferência no alto forno. A reação (2) é fortemente favorecida pelo aumento da temperatura e, pelo princípio de Le Chatelier, a reação (2) é deslocada no sentido das fases condensadas com a elevação da pressão, ou seja, ocorre redução da geração de SiO com a elevação de pressão. Isto explica a influência positiva da elevação do nível térmico e negativa da elevação da pressão de base do Alto Forno sobre o teor de silício do gusa. A reação (3) é favorecida pelo aumento da zona de gotejamento, ou seja, pela elevação da zona coesiva, o que aumenta tempo disponível para a reação.

Vários autores também concluíram que existe condições de oxidação do silício pelo MnO e pelo FeO da escória no cadinho. A reoxidação do silício se dá segundo as reações:



1.6.5 Transferência de Outros Elementos para o Gusa

Os minérios e o coque contêm inúmeras outras impurezas e grande parte delas são reduzidas no Alto Forno . Estas impurezas ou são dissolvidas no gusa ou são removidas via escória ou pelo gás de topo. Algumas destas impurezas, tais como o enxofre e o fósforo, são altamente indesejáveis, pois são bastante prejudiciais à qualidade dos aços produzidos e sua remoção externa ao Alto Forno tem custo elevado.

Óxidos de metais tais como níquel, cobre e chumbo, embora presentes em pequena quantidade, são facilmente reduzidos, de modo que os mesmos são inteiramente dissolvidos pelo gusa. O óxido de fósforo necessita de maiores temperaturas e a redução só é completada na região inferior do forno. A redução do óxido de manganês é mais difícil e ocorre apenas em regiões de temperatura elevada, de modo que a extensão de sua redução varia entre 50 a 75%, dependendo do nível de temperatura atingido, o restante sendo removido pela escória. Portanto, o controle destes elementos no gusa se dá basicamente pelo controle da quantidade carregada.

A maior parte do enxofre carregado no Alto Forno está presente na cinza do coque. Durante a descida da carga, na cuba e na rampa o enxofre é absorvido pelo gusa e pela escória formada e a sua distribuição entre eles é definida pelas condições no cadinho. A limitação do teor de enxofre do gusa é feita inicialmente pelo controle da quantidade carregada, limitando a sua presença na cinza do coque e/ou reduzindo o "coque rate". No processo de Alto Forno as principais ações são para favorecer a sua incorporação à escória, tais como elevação da basicidade da escória e aumento do volume de escória.

1.7 Injeção auxiliar de combustível no Alto Forno

Teoricamente qualquer material que contenha alta porcentagem de hidrocarbonetos é passível de ser injetado pelas ventaneiras do Alto Forno. A lista de materiais já testados é grande inclui plásticos moídos ou aglomerados (serão

vistos num capítulo específico), óleo combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados entre outros. A escolha do material mais adequado passa obviamente pelos aspectos práticos e econômicos desta injeção.

A Injeção Auxiliar de Combustível (IAC) tem como objetivo básico a substituição de parte do coque carregado, objetivando redução de custos. O coque exerce basicamente três funções no Alto Forno :

- Fonte de calor pela reação com o oxigênio do ar injetado;
- Fonte de gases redutores pela reação com o oxigênio do ar injetado e pela subsequente reação de gaseificação do coque pelo CO_2 produzido pela redução em altas temperaturas;
- Leito permeável para suportar os materiais da carga, particularmente nas regiões inferiores do Alto Forno, através do qual o metal e a escória líquidos podem percolar para o cadinho e os gases ascenderem.

O combustível auxiliar injetado pelas ventaneiras pode desempenhar duas das três funções básicas do coque. Estas são prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor. A IAC não pode prover um leito permeável no Alto Forno, como no caso do coque. O uso da IAC pode propiciar os seguintes benefícios:

- Redução de custos pela substituição de coque por combustíveis alternativos de baixo custo, além de redução do consumo energético;
- Grande elevação de produtividade devido possibilidade de elevação do enriquecimento do ar soprado com oxigênio;
- Extensão da vida útil das baterias de coqueificação devido a redução da demanda de coque;
- Maior estabilidade de qualidade do gusa e redução do teor de silício.

O combustível auxiliar é injetado diretamente dentro da zona de combustão através das ventaneiras juntamente com o ar quente, que pode ser enriquecido com oxigênio. O combustível auxiliar é injetado, absorve calor, devolatiliza-se e inicia a combustão logo que deixa a lança de injeção.

A **Figura 17** mostra a injeção do combustível auxiliar carvão pulverizado por meio de uma lança, inserida no sistema de sopro de ar quente, de modo que o fluxo desse carvão se misture com o fluxo de ar injetado, facilitando a combustão do mesmo.

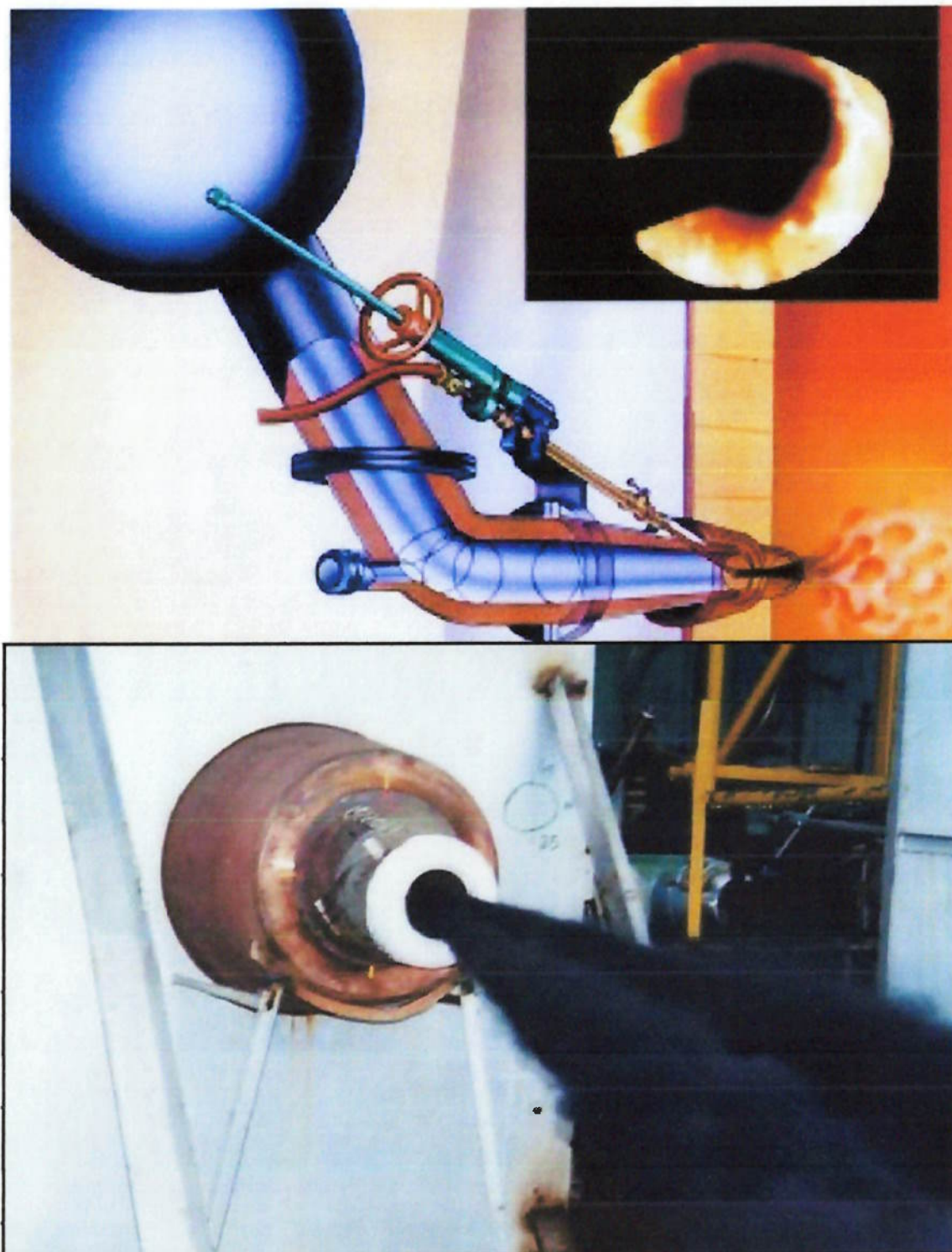


Figura 17 - Injeção de combustível auxiliar através de uma lança inserida pela ventaneira. No detalhe a foto superior, através do visor, do carvão pulverizado em combustão na ponta da lança. Na foto inferior simulação interna da injeção.

Além destes fenômenos que ocorrem na zona de combustão, elevação da IAC resulta em redução significativa do "coke rate", ou seja a coluna de carga do forno conterá cada vez mais carga metálica e menos coque. A **Tabela 1** resume os fenômenos que ocorrem no alto forno operando com baixo "coke rate" em função de elevadas taxas de IAC.

Operação com baixo "coke rate" devido aumento da IAC	Aumento da Relação Minério/ Coque	Redução do ângulo de repouso médio da carga	Aumento da quantidade de minério na região central	Supressão do fluxo gasoso central	Aumento do fluxo gasoso periférico e de deslizamentos
		Redução da permeabilidade nas zonas seca e coesiva			Aumento da queda de pressão total
		Aumento de espessura da zona coesiva			Redução da capacidade de fusão
		Redução da queima de coque na zona de combustão	Redução da velocidade relativa de descida da carga	Aumento da relação de fluxo térmico	Aumento da perdas térmicas pelas paredes
	Aumento da taxa de injeção de carvão	Aumento do volume de gás nas ventaneiras			Aumento da queda de pressão nas ventaneiras
		Redução da temperatura de chama	Redução da temperatura do homem morto		Redução da permeab. do homem morto
		Redução da relação de fluxo térmico	Aumento da temperatura do gás de topo		Relação de substituição é reduzida
			Aumento do volume de gás de rampa		Aumento da queda de pressão na rampa
			Elevação do nível		Aumento da perdas

			da zona coesiva		térmicas e do Si do gusa
		Aumento da entrada de H_2			Aumento da redução pelo H_2
		Prolongamento do ciclo de renovação do homem morto			Aumento do fluxo periférico e da temperatura do homem morto

Tabela 1- Fenômenos que ocorrem na operação com baixo “coke rate”

1.7.1 Injeção de Carvão Pulverizado no Alto Forno

Praticamente todos altos fornos brasileiros que praticam injeção de combustíveis auxiliares utilizam o carvão (vegetal ou mineral) pulverizado.

Todas as usinas objetivam injetar a máxima quantidade possível de carvão de modo a reduzir custos. Porém à medida que a taxa de injeção aumenta ocorre uma tendência de elevação da quantidade de carvão não-queimado (“char”) e da energia cinética do sopro, causando :

- Variações no formato da zona de combustão e instabilidade da zona de combustão;
- Redução da permeabilidade do coque nas vizinhanças da zona de combustão;
- Aumento da degradação do coque na zona de combustão;
- Variações na distribuição de temperatura da zona de combustão;

Outras informações sobre a Injeção de Carvão Pulverizado no Alto Forno , serão fornecidas nos capítulos seguintes

2.0 DESENVOLVIMENTO

2.1 EXPERIÊNCIA DA PAUL WURTH

2.2.1 Equipamento para o Topo do Forno

2.2.1.1 Topo Sem Cone

A introdução do Topo Sem Cone , no início dos anos 1970 (**Figura 18**) foi um marco no desenvolvimento do processo dos Altos Fornos , e se tomaram muito valiosas aumentando o tamanho da goela do Alto Forno e eliminando as limitações práticas do sistema com cones e armadura móvel.

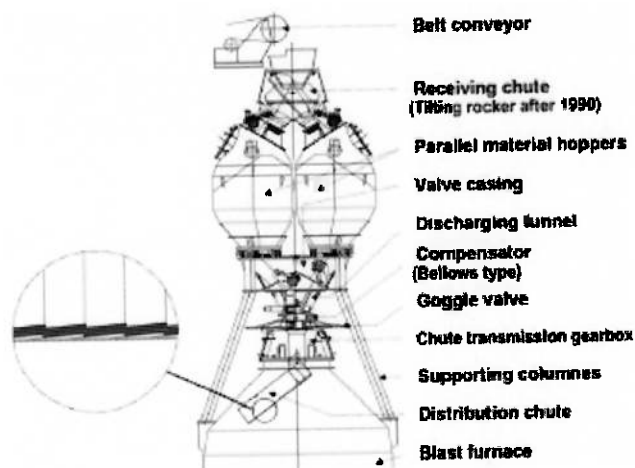


Figura 18 - Duas tremonhas (paralelas) do Topo Sem Cone

As duas tremonhas foram projetadas para o operador como uma ferramenta para controle da distribuição de carga e gasosa , cujos benefícios são brevemente descritos na **Figura 19**.

Após a instalação do protótipo do Topo Sem Cone em 1972, a colaboração entre projetistas e usuários tem contribuído para o aperfeiçoamento do projeto . Por exemplo, para uma goela com diâmetro superior a 10 m , o peso da calha se tornou demasiado grande para uma velocidade padrão e uma nova calha reforçada foi introduzida.

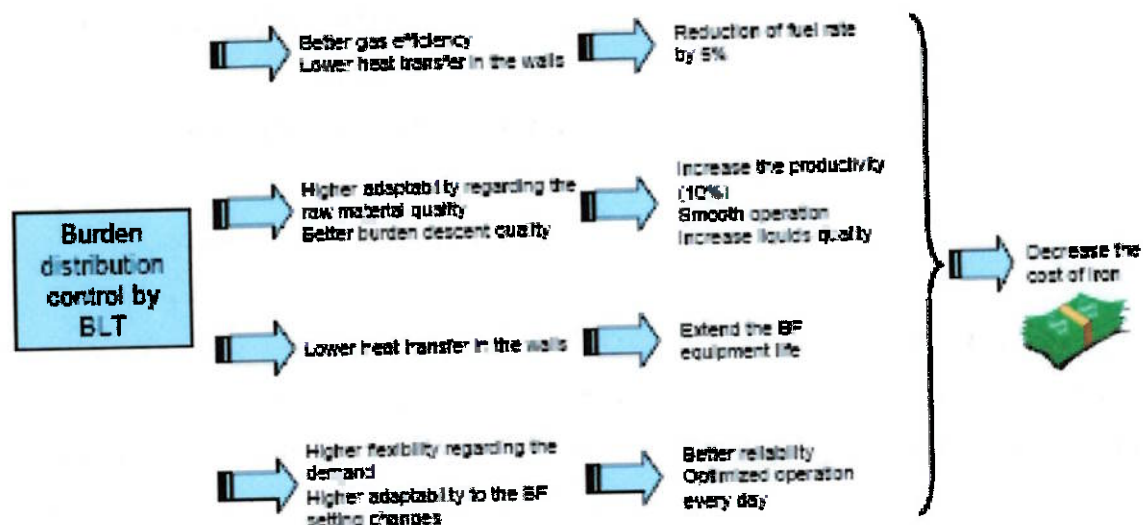


Figura 19 - Benefícios do Topo Sem Cone versus sistemas do sistema com cones + armadura móvel

A calha rotativa inicialmente foi refrigerada utilizando nitrogênio, gás natural ou de gás de Alto Forno queimado. Em 1984 a refrigeração da calha rotativa com a água se tornou o padrão, proporcionando um maior nível de refrigeração a um menor custo da energia (Figura 20).

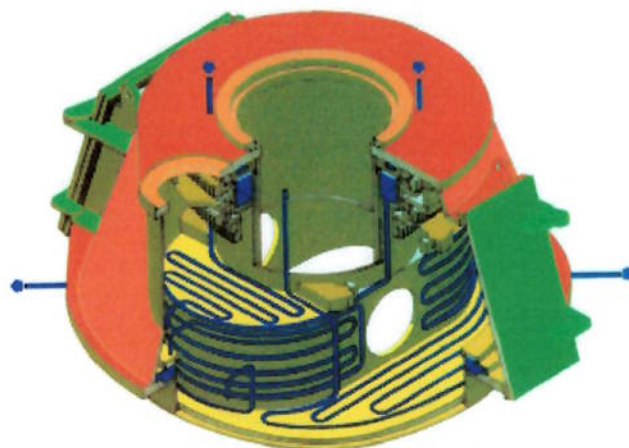


Figura 20 - Calha rotativa do Topo Sem Cone refrigerada com água

Durante os anos 1980 e 90 foram introduzidos o Topo Sem Cone com carregamento central, compactado, e os denominados mini para satisfazer o

mercado de fornos que produzem menos de 7000 ton /dia. A concepção com duas tremonhas (paralelas) com sua inerente flexibilidade continuou a ser o padrão para fornos para a produção acima de 7000 ton / dia .

2.2.1.2 Topo Sem Cone com três tremonhas

O primeiro Topo Sem Cone com três tremonhas foi instalado na Mittal Steel, Sparrows Point Works, E.U.A., em 1977. A justificativa para esta inovação, quando foi concebida, em 1972, foi que a tremonha em paralelo com refrigeração , foi uma nova tecnologia implantada e existia a necessidade de uma terceira tremonha , para o caso da necessidade de manutenção em um dos dois alimentadores em trabalho. Desde a implantação o sucesso do topo com duas tremonhas paralelas tem demonstrado que uma tremonha "standby" não é necessária.

Mudanças das práticas de carregamento e distribuição de carga nos Altos Fornos , tem levado a uma revisão no conceito de três tremonhas (**Figura 21**). Estas mudanças incluem:

- A utilização de finos de sínter carregados na periferia do forno com intuito de proteger as paredes.
- A introdução do carregamento de coque central como um meio de otimizar as condições de esgotamento e do tamanho de coque no cadinho para manter a boas condições de drenagem, especialmente em altas taxas de PCI.

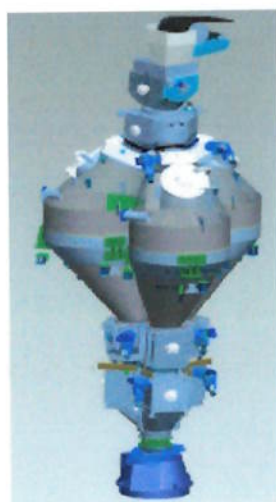


Figura 21 - Novo Topo Sem Cone com três tremonhas (patente pendente)

2.2.2 Esgotamento do Cadinho

Um processo de esgotamento consistente com fluxo regular de gusa e escória contribui significativamente para a estabilidade da operação de um Alto Forno. O altura dos líquidos no cadinho tem de ser controlada. Isto pode ser feito com medições.

A alternativa é um modelo de gestão de esgotamento que equilibra a taxa de produção de ferro e escória com o carregamento nos carros torpedo e painéis que são continuamente pesados, e informações do sistema de granulação de escória. Uma prática de vazamento regular e repetitiva é influenciada pelos equipamentos, embora estável o fluxo de escórias e de ferro, depende do desempenho da massa de tamponamento.

Atingir taxas de esgotamento regular levou à introdução de massas de tamponamento de baixo desgaste e que tipicamente têm elevada resistência de compressão a frio.

O desempenho dos canhões de lama e perfuratrizes teve de ser substancialmente melhorado para elevar os níveis mais elevados de robustez, de serviços e confiabilidade necessários para a gestão do esgotamento dos modernos Altos Fornos.

Atualmente além do aumento da performance dos equipamentos das casas de corrida, o mesmo é projetado para fornecer informações valiosas dos furos de gusa que podem ser utilizadas para a otimização do processo e ajudar no diagnóstico e manutenção dos furos de gusa.

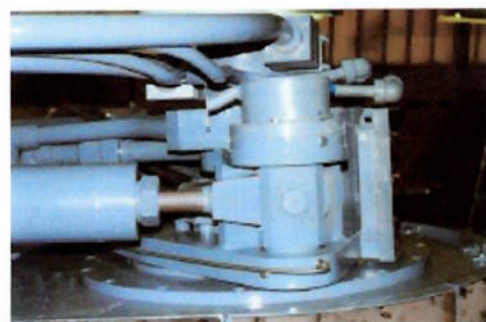
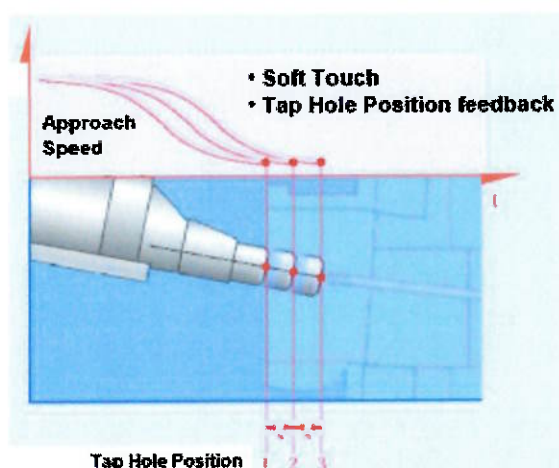
A **Figura 22** ilustra a organização atual dos equipamentos de esgotamento.



Figura 22 - Organização dos equipamentos de esgotamento

A organização preferida é um projeto compacto com máquinas de furos de gusa localizadas ao mesmo lado da capela , em muitos casos, sob a plataforma das ventaneiras .

O deslocamento do canhão de lama é controlado para evitar danos a estrutura do furo de gusa . Codificadores de posição fornecem as informações necessárias para a desaceleração automática de velocidade quando se aproximam do furo de gusa e ajustando a posição correspondente a face do furo de gusa (**Figura 23**).



Rotary position transmitter on the guide rod fixation

Figura 23 - Proteção ótima do furo de gusa

Na busca por maiores níveis de segurança para o furo de gusa, os operadores desejam usar a pressão máxima disponível de fechamento e têm adotado uma dupla técnica de fechamento como mostrado na **Figura 24**, para maximizar a densidade da massa de tamponamento no furo de gusa.

VELOCIDADE DE INJEÇÃO

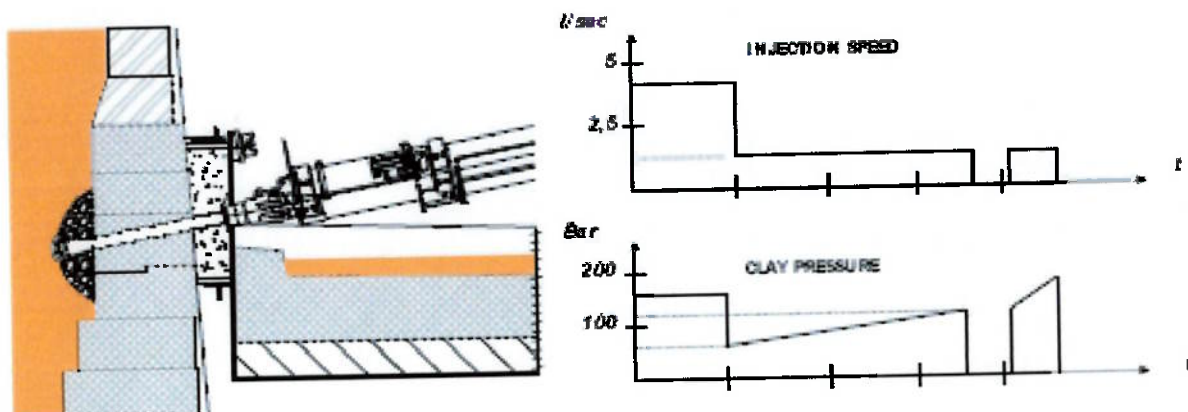


Figura 24 - Prática de fechamento do Furo de Gusa PRESSÃO DO CANHÃO

O cilindro de um canhão de lama tem capacidade de um barril de 250 litros e a pressão exercida sobre a massa é de 200 kg/cm² (g). Um dos projetos prevê o uso de massas de tamponamento "super" resistentes onde a pressão de extrusão é superior a 250 kg/cm² (g).

Massas de tamponamento mais duras, bem como a utilização de broca com diâmetros maiores tem levado as perfuratrizes pneumáticas tradicionais utilizadas para furar os furos de gusa a um desempenho limitado. Os resultados provocam um aumento da manutenção e menor confiabilidade durante a abertura dos furos de gusa. Devido às maiores exigências no desempenho na impulsão para furar, bem como a rotação e o martelo, a perfuratriz hidráulica supera a pneumática. O torque para furação pode atingir ao dobro na "Hidráulica" em relação ao torque da "pneumática". Com o desempenho mais elevado das máquinas hidráulicas, a utilização do martelo pode ser minimizada, preservando assim, a estrutura do furo de gusa. A comparação de perfuratrizes hidráulica vs pneumática é mostrada na **Figura 25**.

PNEUMATIC HAMMER	HYDRAULIC HAMMER
• Lower torque • Lower hammer efficiency • Longer hammering time • Less precise feedback	• Higher torque • Higher hammer efficiency • Hammer used less • Accurate tap hole status feedback
• Lower investment • Higher maintenance	• Higher performance • Faster opening • High quality tap hole channel

Figura 25 - Comparação de perfuratrizes hidráulica vs pneumática

As perfuratrizes hidráulica estão aptas a fornecer respostas rápidas e medidas operacionais. Isso permite o controle muito preciso dos parâmetros de perfuração. Utilizando o retorno preciso das informações, um algoritmo de controle minimiza a utilização do martelo.

A abertura controlada do furo de gusa com o martelo favorece o uso de uma única broca. Para atender a essa necessidade a perfuratriz hidráulica incorpora uma névoa de água / ar para esfriar a pastilha da broca.

A **Figura 26** ilustra um típico registro de um processo de perfuração, e realça a utilização limitada do impacto do martelo.

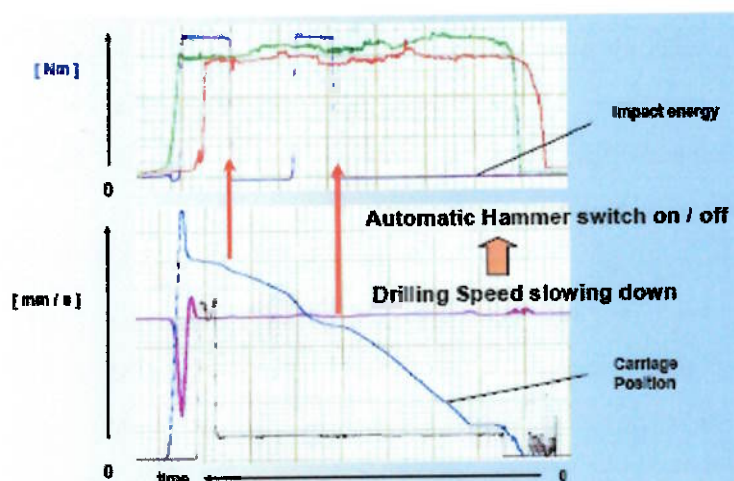


Figura 26 - Controle do martelo durante a abertura do furo de gusa

2.2.3 Duração de Campanha

O prolongamento da campanha ou a vida do Alto Forno é agora um dos principais contribuintes para a redução dos custos na Siderurgia . Os sistema de refrigeração dos Altos Fornos (**Figura 27**) tornaram-se cada vez mais importantes, pois a durabilidade e a vida útil de um Alto Forno é altamente dependente da eficiência deste tipo de sistema .

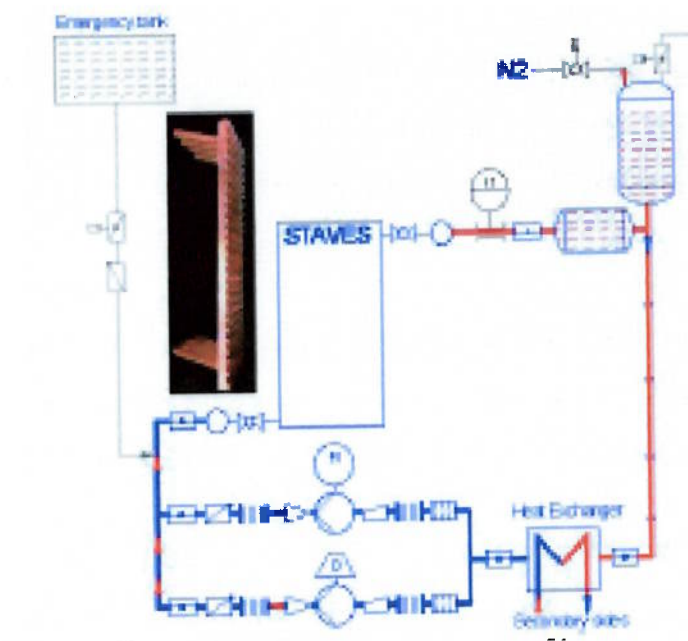


Figura 27 - Os sistema de refrigeração típico para Altos Fornos

Os recentes desenvolvimentos na aplicação de Staves de cobre na zona alta de calor, em conjunto com o resfriamento da água circuito fechado com recirculação, asseguram para a comunidade siderúrgica que uma campanha 20 anos é uma realidade. Adicionalmente, a introdução deste tipo de Sistema de refrigeração , a estratégia de manutenção de restringir a um máximo de 3 paradas programadas / ano, fornecem uma base para a continuidade e estabilidade operacional do processo. No passado, desgaste dos refratários no ventre e cuba inferior , especialmente da metade dos anos da campanha para frente , provocaram prejuízos à estabilidade da descida de carga.

2.2.4 Engenharia do Conhecimento

Balanços de massa e de calor foram colocados à disposição do operador, na primeira metade do século 20. No entanto, tais balanços de calor consideravam o Alto Forno como uma "caixa preta" e só levavam em conta as variáveis de entrada e de saída. Eles forneceram uma fonte útil de informações para comparar práticas operacionais utilizando a média de dados de um longo período.

Modelamentos do processo do Alto Forno avançaram quando as leis gerais da termodinâmica, incluindo a segunda lei (que estipula que o calor não pode ser transferido a partir de uma temperatura mais baixa para um nível mais elevado), foram reconhecidos como fundamentais para o processo do Alto Forno.

Estes modelos avançados produzidos, consideravam as reações e a transferência de calor na cuba separadamente das que ocorrem no ventre e na região de ventaneiras. Indicaram que num nível intermediário entre o nível de carregamento e as ventaneiras, a diferença de temperatura entre os gases e os sólidos está num patamar mínimo (zona de reserva térmica).

Cálculos de transferência de calor, mais tarde confirmados por medições diretas, indicaram que esta temperatura crítica situa-se no intervalo 900 - 950 °C, onde a reação "Solution Loss" se inicia. Com este conhecimento abrangente, foi desenvolvido um modelo que descreve o processo do Alto Forno, por um conjunto de equações que poderiam ser utilizadas tanto para a análise operacional e em cálculos de previsão.

Durante os últimos 30 anos muitos estudos e experiências têm ajudado a comunidade dos Altos Fornos, para a definição dos conhecimentos exigidos para a modelagem dinâmica do processo do Alto Forno. Este trabalho tem impulsionado o desenvolvimento dos mais sofisticados aparelhos e sensores de monitoramento.

A **Figura 28** ilustra os sistemas de equipamentos e instrumentos, associados com a atual geração dos modelos e sua utilização como conhecimentos bases dos sistemas de controle do Alto Forno.

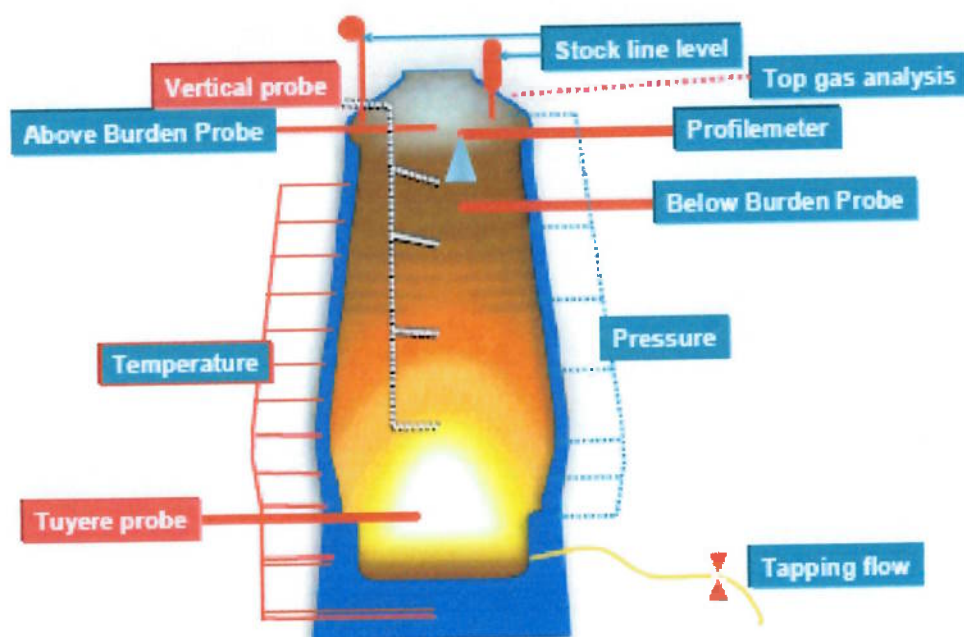


Figura 28 - Sistemas de equipamentos e instrumentos de monitoramento do Alto Forno

Os dois equipamentos de monitoramento a seguir, são considerados como instrumentos básicos para verificar e controlar a distribuição de gás na cuba do forno:

- Perfilômetros usando a última tecnologia de radar, para medir o perfil da carga e a velocidade da descida de carga em diferentes níveis do carregamento. O perfil da carga de carregamento, permite o operador de validar ou corrigir as previsões do seu modelo de carregamento.
- Sonda penetrante proporciona um sistema de medição e análise de gás, temperatura e pressão. Esta sonda fornece informações sobre distribuição de gás, permeabilidade, aproveitamento do gás e índice de redução.

Aparelhos especiais de medição que foram projetados para ajudar o desenvolvimento de modelos refinados de Alto Forno e de uma melhor compreensão do processo Alto Forno são eles:

- Sonda de ventaneira que informa sobre distribuição de gás dentro da zona de combustão durante a operação normal do Alto Forno. Durante uma parada para manutenção do Alto Forno, uma amostragem completa do núcleo homem morto no interior do forno pode ser realizada.
- Sonda vertical que informa sobre a temperatura e a composição do gás e de tarificação no nível da carga na altura da zona coesiva . Adicionalmente ela pode medir o comportamento da carga, uma vez que também é descendente.

Tornou-se necessário criar sistemas em que o conhecimento dos melhores operadores , está disponível na sala de controle nas 24 horas do dia e nos 7 dias da semana, a fim de que o tempo limitado para análise , possa ser dedicado para a determinação das melhores atuações a realizar diante de uma situação reconhecida .

Sistemas especialistas foram desenvolvidos , de modo a fornecer uma ferramenta analítica em tempo real para o funcionamento de um Alto Forno, e que assiste ao operador de um plano estratégico para as melhores prática operacionais do Alto Forno, integrando o "conhecimento" em três níveis:

- Tecnologia ou conhecimentos empíricos que vem de muitos anos de controle do Alto Forno , por membros da equipe com larga experiência nesta área.
- O conhecimento científico que fornece uma explicação e quantificação do conhecimento empírico. Este conhecimento encarna a conclusões dos estudos, bem como os resultados das sondagens , para medir as condições físicas e químicas dentro dos Altos Fornos .
- Conhecimento ergonômico, que é o conhecimento necessário para construir uma interface homem máquina projetada para os operadores do Alto Forno .

Um sistema especialista abrange todas as áreas do processo do Alto Forno , como mostrado na **Figura 29**.



Figura 29 - Áreas do processo do Alto Forno monitoradas / controladas por um Sistema Especialista

Uma grande vantagem do sistema especialista é que , quando as condições operacionais do Alto Forno mudam , o sistema reconhece os novos objetivos , assumindo as mudanças das condições existentes . A **Figura 30** apresenta o ciclo de tomada de decisão .

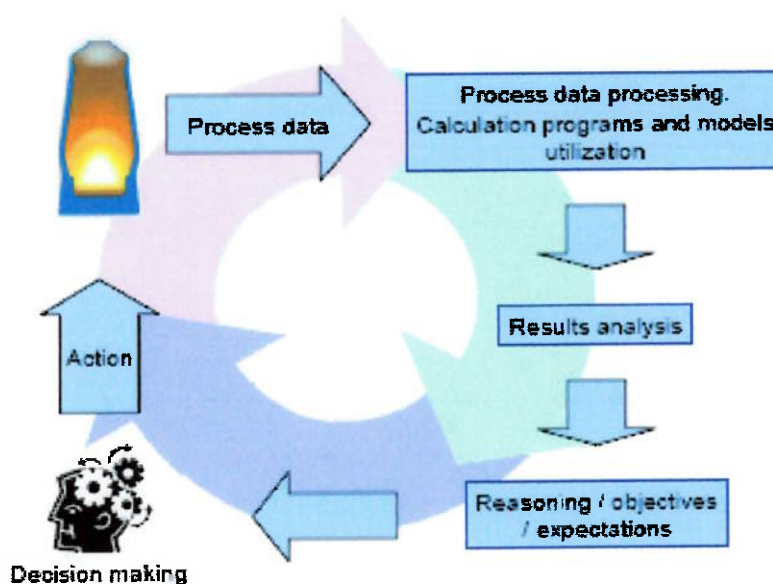


Figura 30 - O ciclo de tomada de decisão

O sistema de coleta e processa até 5000 informações por minuto, validando os dados, e compara-os com os dados sintéticos específicos , para os ajustes operacionais do Alto Forno . Esta validação técnica e comparativa produz alarmes, relatórios de controle , previsões e recomendações para ações térmicas.

Figura 31 ilustra os resultados de controle de temperatura e de silício do gusa , associados com o fuel rate e com as melhores condições. A temperatura do gusa é controlada dentro dos limites entre 1480 e 1520 ° C.

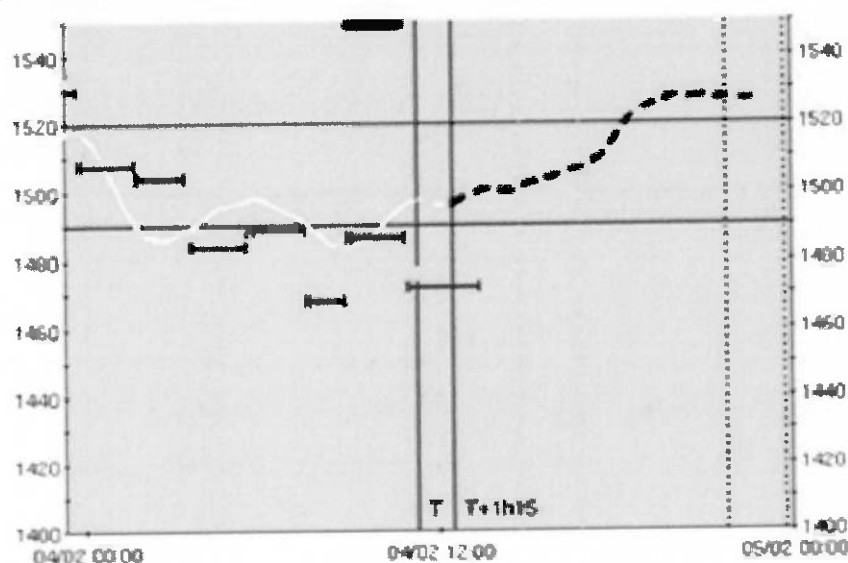


Figura 31 - Controle da temperatura do gusa no Alto Forno

2.2 EXPERIÊNCIA DA NKK

Dentro do desenvolvimento tecnológico realizado na década de 1990 , algumas tecnologias individuais foram implantadas em processos próprios e foram combinados para se alcançar objetivos maiores.

Nos anos 90, assistiu-se ao desenvolvimento de várias novas tecnologias fechando o século 21. Por exemplo, elevadas taxas de injeção de carvão pulverizado foi conseguida através de uma combinação da tecnologia de operação dos Altos Fornos com a utilização sinter produzido com minério de alta qualidade , além de equipamentos que permitiram os Altos Fornos operarem com participação elevada . Outro desenvolvimento foi processo revolucionário

denominando "Escória Zero" para a Aciaria , através do estabelecimento da operação do Alto Forno com baixo silício através da otimização das propriedades das matérias-primas.

2.2.1 Desenvolvimento de tecnologias na década de 1990

A **Figura 32** mostra a evolução dos principais parâmetros operacionais nos Altos Fornos da NKK .

Apesar da tecnologia de injeção de elevadas quantidades de carvão pulverizado foi desenvolvida ativamente, a primeira experiência mundial prática de consumo de resíduos plásticos injetados em Altos Fornos também foi estabelecida pela NKK . Um problema comum em ambos , tanto para o carvão pulverizado como na injeção de resíduos plásticos tem sido que a variação da pressão tende a aumentar na região inferior dos Altos Fornos , devido à acumulação de resíduo de carvão não queimado (char) . Este problema foi superado pelo estabelecimento de novas técnicas de controle de distribuição de carga, utilizando plenamente uma válvula de controle do sopro quente e o NOVO-CFC, de forma controlar diretamente a região inferior do Alto Forno.

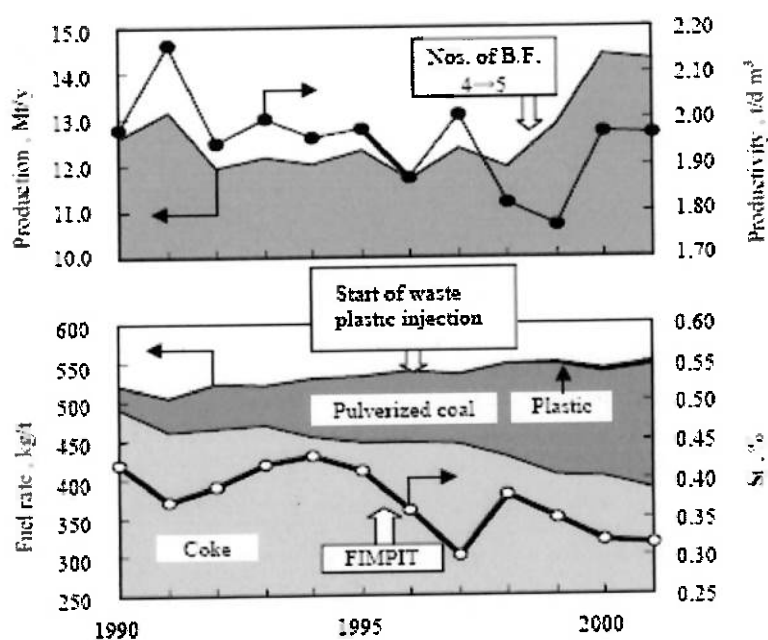


Figura 32 - Evolução dos principais parâmetros operacionais dos Altos Fornos da NKK

No que diz respeito à qualidade do gusa, os esforços há muito tempo têm sido feitos para reduzir o teor contido de silício objetivando reduzir os custos no refino do aço na Aciaria . Em 1996, foi desenvolvida uma nova técnica, denominada FIMPIT (tubos em fibra metálica para temperatura do ferro gusa para a medição de temperatura do gusa diretamente no furo de gusa .

Foi instalado a fim de reforçar o controle nível térmico e , como resultado, uma produção de gusa estável com baixo teor de silício se tornou possível .Em outubro 1997, foi alcançado um recorde mundial em termos do teor de silício contido (menor que 0,2%) na média entre o gusa produzido ao longo de um mês numa Aciaria.

Em termos do prolongamento da campanha dos Altos Fornos, propriedades dos refratários e sistemas de refrigeração foram melhorados . Estas melhorias foram sucessivamente aplicadas quando os Altos Fornos foram reformados . Melhorias técnicas também foram feitas em termos de recuperação da região da rampa e da cuba , durante a operação normal dos Altos Fornos .

Como resultado, o Alto Forno No.5 da usina de Fukuyama, que iniciou suas operações em 1986, ainda está em operação após 17 anos. Isso é notável quando comparado com outros Altos Fornos , que iniciaram suas operações na década de 1970, cujas campanha realizadas ficaram variando entre cinco e sete anos (Figura 33) .

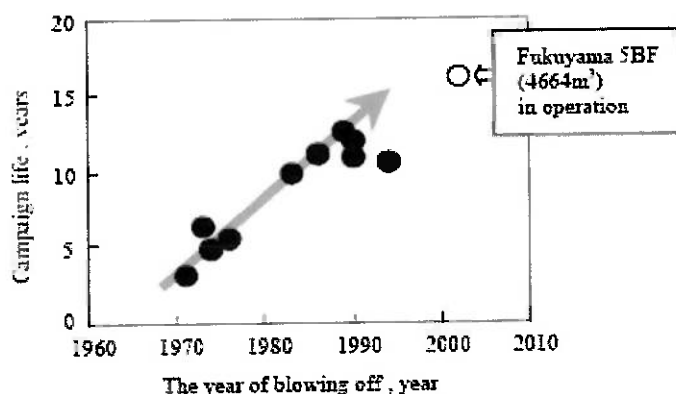


Figura 33 - Evolução da duração das campanhas dos Altos Fornos da NKK

Alguns desses antigos Altos Fornos atingiram níveis de produtividade de 1,9 t/d-m³ e de PCR (Taxa de carvão pulverizado) de 170 kg / t, fornecendo grandes contribuições para o aumento da produtividade.

Entre as tecnologias desenvolvidas para prolongamento das campanha dos Altos Fornos durante a década de 1990, está incluída a nova tecnologia para a substituição dos Staves da região da rampa e a recém-desenvolvida refrigeração com Staves de cobre para longa duração .

Em 1999, todos os 60 Staves do Alto Forno No.4 de Fukuyama foram substituídos por Staves de cobre .Todo trabalho de substituição foi concluído num período de apenas 87 horas numa parada programada do forno , instituindo dessa forma um metodo rápido de substituição de um Sistema de Staves . O desempenho operacional imediatamente antes e depois desta parada programada é mostrado na Figura 34 .

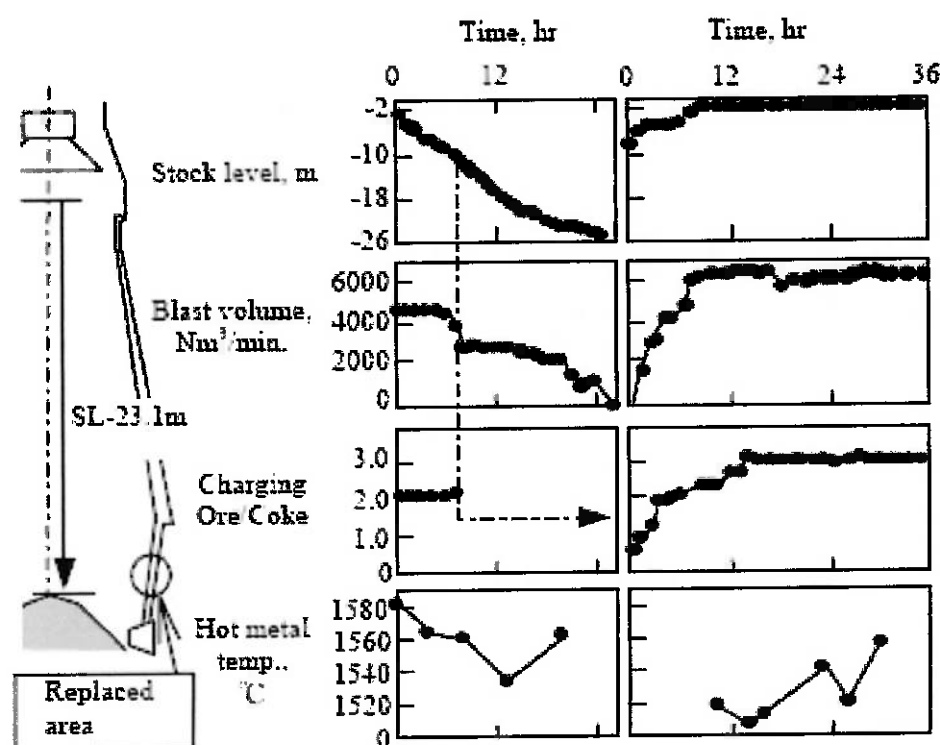


Figura 34 - Desempenho operacional do Alto Forno No.4 de Fukuyama , antes e depois da substituição dos Staves da região da rampa

2.2.2 Injeção de Carvão Pulverizado no Alto Forno

2.2.2.1 Operação com elevadas taxas de injeção

A **Figura 35** mostra os anos das construções dos equipamentos de PCI (pulverizado Coal Injection) dos Altos Fornos da NKK e a evolução do PCR (Taxa de carvão pulverizado).

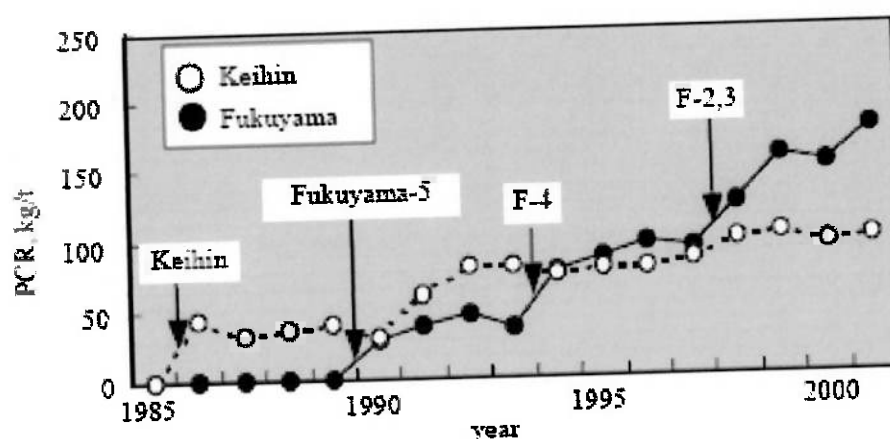


Figura 35 - Anos das construções dos equipamentos de PCI e evolução do PCR

Geralmente, a operação do PCI de um Alto Forno tende a provocar os seguintes problemas:

- (1) A permeabilidade na zona superior dos Altos Fornos piora com o aumento da relação minério / coque .
- (2) A permeabilidade na zona inferior do Alto Forno piora devido ao acúmulo dos finos de coque .
- (3) A eficiência da combustão do carvão pulverizado piora com o aumento do PCR.

Com o objetivo de superar os problemas que dificultam operação estável do Alto Forno, a NKK tem promovido ativamente o desenvolvimento de técnicas , como o controle da distribuição de carga ideal, usando o NOVO-CFC, projetando

propriedades mais adequadas dos minérios sinterizados ao consumo elevado de PCI, e elevando a eficiência da combustão do carvão pulverizado queimado.

2.2.2.2 Injeção de carvão pulverizado com elevada combustibilidade

É importante para aumentar a combustibilidade de carvão pulverizado no bico da ventaneira, de modo a tornar eficiente o uso de carvão pulverizado como fonte de calor e agente redutor em Altos Fornos sem desperdiçá-lo como finos contido no gás gerado pelo topo do forno.

Modelos numéricos foram empregados para avaliar os efeitos do posicionamento da lança sobre o comportamento da combustão do carvão pulverizado na tubulação de sopro. Os resultados são mostrados na **Figura 36**. No caso (c), duas lanças posicionadas excêntrica, de modo a evitar a colisão do fluxo de carvão pulverizado e acelerar a combustão. Estima-se que a posição da lança dupla excêntrica, aumentou a eficiência da combustão por mais de 15%, quando comparada com a utilização da lança simples convencional (**Figura 37**). Esta lança foi adotada pela primeira vez em abril de 1994. Posteriormente, todos os Altos Fornos da NKK foram equipados com ela, sendo uma grande contribuição para uma operação com elevadas taxas de PCI.

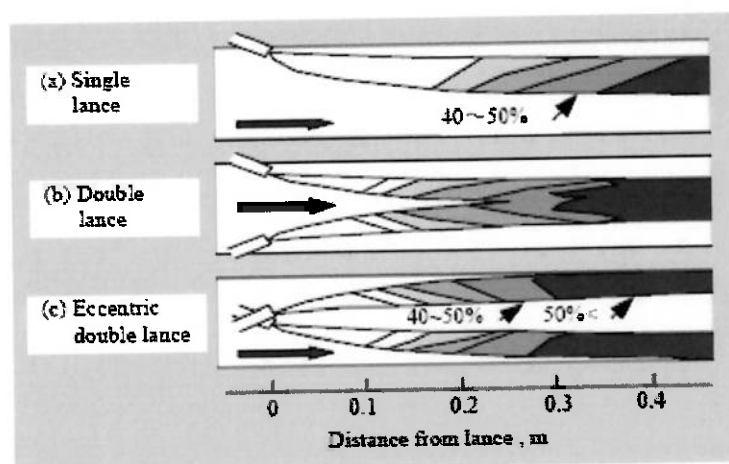


Figura 36 - Efeitos do posicionamento da lança no fluxo do carvão pulverizado e eficiência da combustão

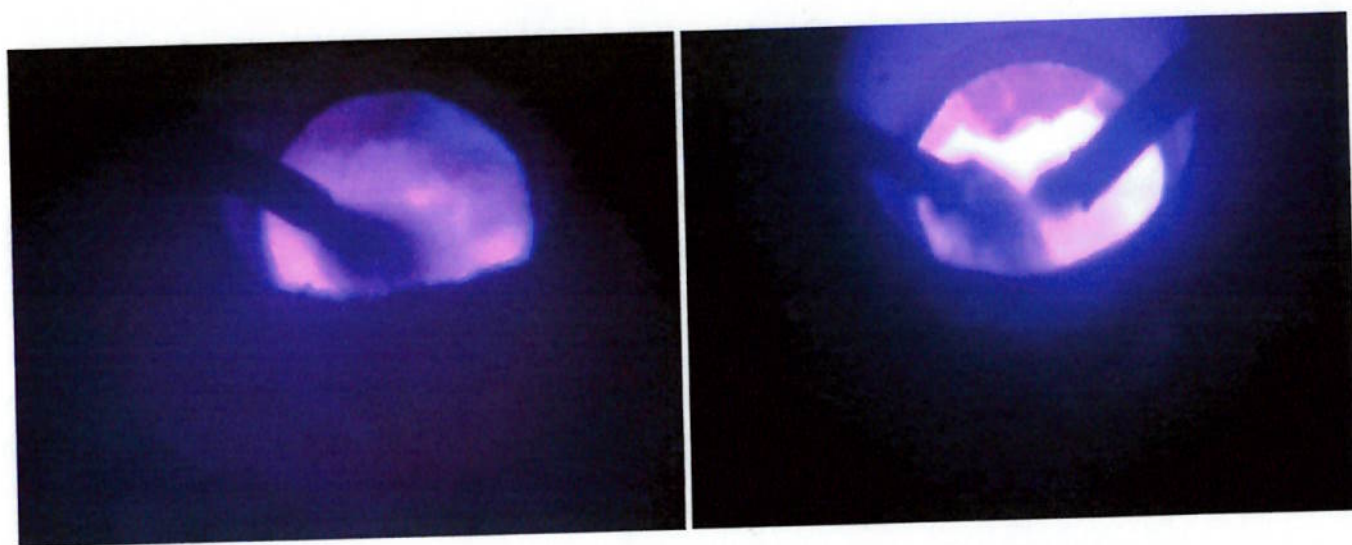


Figura 37 – Visualização da Lança Simples e da Lança dupla excêntrica

2.2.2.3 Propriedades otimizadas do Sínter para operação com elevadas taxas de PCI

A degradação sob redução dos minério sinterizados tende a ser causado na zona superior do Alto Forno, devido às baixas temperaturas nesta região . À medida que a operação com elevadas taxas de PCI reduz a taxa do fluxo de calor , esta zona de baixa temperatura é estreitada, sugerindo que a degradação sob redução do sínter poderia ser reduzida por uma operação com elevadas taxas de PCI.

A fim de se obter propriedades otimizadas do sínter para a operação com elevadas taxas de PCI, várias tentativas foram feitas para baixar o teor contido de SiO_2 do minério HPS , e aumentar a redutibilidade (RI) do minério sinterizado e , ao mesmo tempo relaxando a especificação do RDI .

O efeito do teor contido de SiO_2 no minério sinterizado , na permeabilidade Alto Forno foi investigado no Alto Forno No.4 da usina de Fukuyama. Os resultados são mostrados na **Figura 38**.

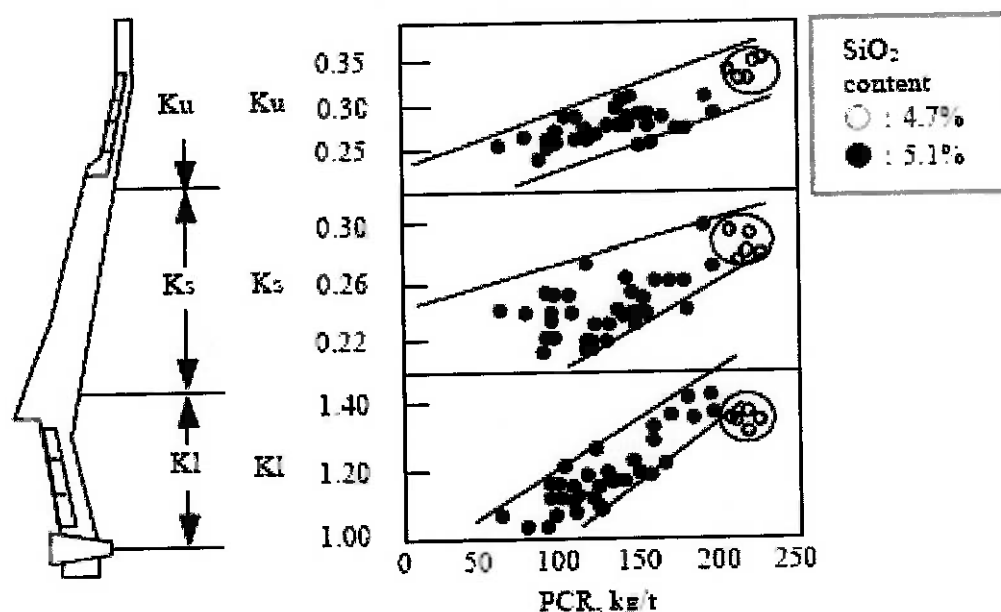


Figura 38 - Efeitos do teor de SiO₂ no minério sinterizado na permeabilidade do Alto Forno

Foi verificado que os minérios sinterizados com baixo teor SiO₂ (RI alto, RDI alto) podem melhorar significativamente a permeabilidade na região inferior do forno, mantendo ao mesmo tempo a permeabilidade na região superior. Este comportamento é atribuído aos fatores como : a degradação sob redução na zona superior será enfraquecida , apesar do RDI elevado devido ao referido efeito ; e as propriedades de redução e amolecimento na zona coesiva são significativamente melhoradas devido ao aumento da RI .

Estes desenvolvimentos tecnológicos levaram ao recorde japonês de PCI de 218 kg / t atingidos pelo Alto Forno No.4 de Fukuyama em outubro de 1994, e ao recorde mundial de 266 kg / t alcançado pelo Alto Forno No.3 Fukuyama em junho de 1998 . Mais recentemente, Usina de Fukuyama obteve uma de média 210 kg / t em todos os fornos. Este foi o recorde mais elevado entre os registados no mundo por uma usina siderúrgica integrada com quatro Altos Fornos grande porte .

2.2.3 Sistema de refrigeração

2.2.3.1 Desenvolvimento de um sistema altamente resistente

Modelos experimentais a quente e medições realizados nas operações dos Altos Fornos , indicaram que a operação com elevadas taxas de PCI tendem a deslocar o ponto central da combustão (ponto de mais alta temperatura na zona de combustão) em direção do bico da ventaneira , e também que grandes quantidades de escórias provenientes das cinzas do carvão pulverizado , tendem a acumular no final da zona de combustão , formando uma camada de baixa permeabilidade .

Estes fenômenos poderiam confinar o fluxo gasoso da região inferior do forno para a área periférica, aumentando assim a carga térmica na cuba .

Em contrapartida foi desenvolvido um sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido com alta condutividade térmica. O sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido proporciona um elevado nível de resfriamento, prevenindo assim deformações térmicas (**Figura 39**) .

Devido ao seu desempenho superior de refrigeração, escórias formam uma camada auto protetora sobre a superfície interna do revestimento da cuba , evitando assim o desgaste físico sobre o corpo do stove refrigerado. Como resultado, o recém-desenvolvido sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido , oferece uma excelente resistência a elevada carga térmica .

O Efeito da implantação de um sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido , pode ser observada pela **Figura 40**.

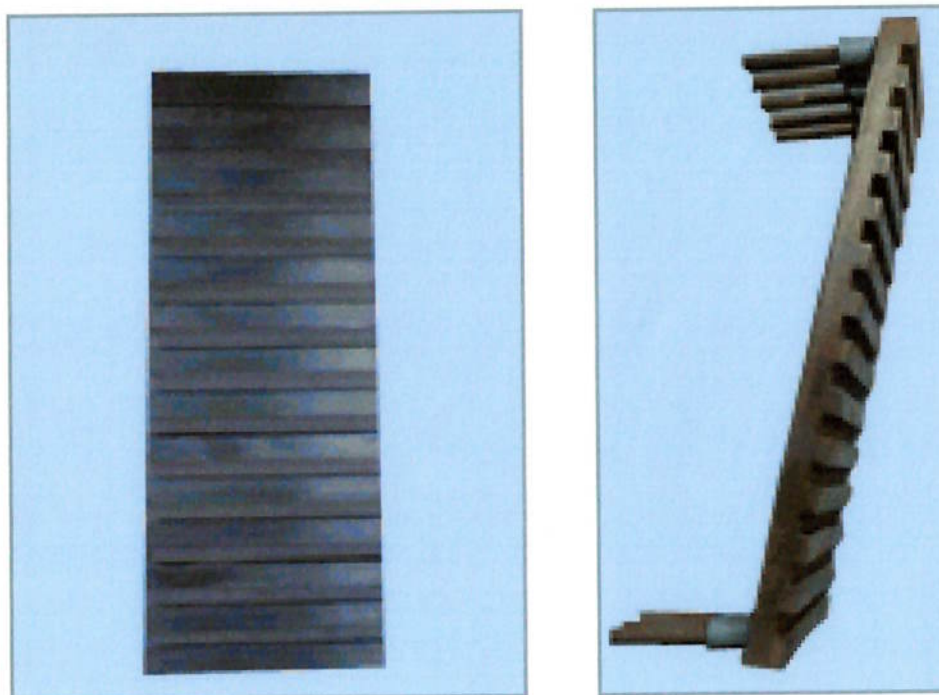


Figura 39 - Sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido com alta condutividade térmica

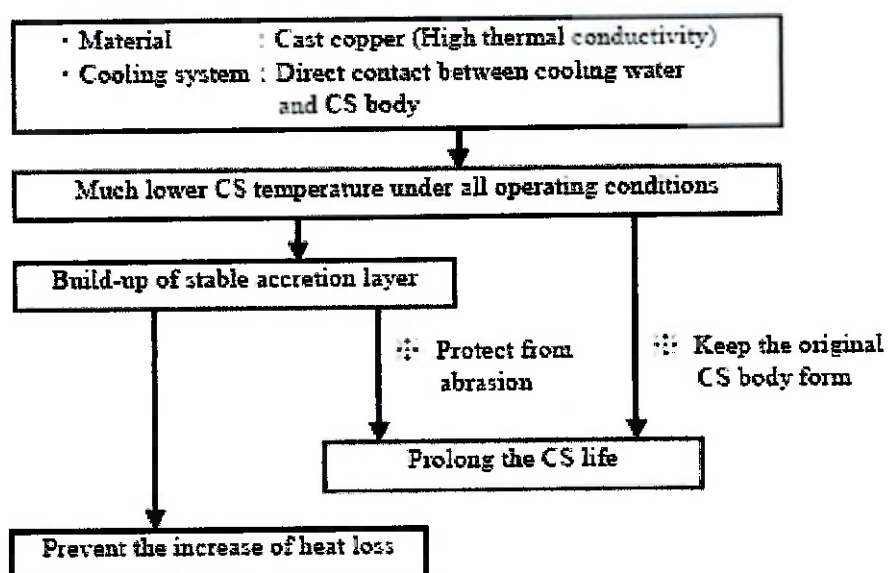


Figura 40 - Efeito da implantação de um sistema de refrigeração de Staves de cobre fundido

2.2.4 Qualidade do Ferro Gusa

2.2.4.1 Tecnologia de produção de gusa com baixo teor de silício

Nos últimos anos, em função da crescente redução do consumo de materiais fluxo e ferroligas no processo da aciaria foi necessária, por conseguinte, a redução da geração de escória, e a operação com escória zero nos conversores é cada vez mais desejada. Como resposta, foram desenvolvidas tecnologias que objetivam reduzir o teor de silício contido no gusa enviado para o processo da aciaria. Duas abordagens foram definidas: a primeira foi reduzir o teor de silício contido no gusa antes do vazamento e a segunda reduzir o teor de silício contido no gusa após ter sido vazado nos Altos Fornos.

2.2.4.2 Desenvolvimento da tecnologia FIMPIT e redução do teor de silício contido no gusa

É importante para determinar o nível térmico num Alto Forno com precisão e em tempo real, a modo de reduzir o teor de silício contido no gusa antes dele ser vazado. Para que isso seja realizado, é fundamental ser possível medir a temperatura no gusa direta e imediatamente após ter sido vazado num furo de gusa. No entanto, a região do furo de gusa possui um ambiente agressivo, com alta temperatura do gusa fluindo dos Altos Fornos, e se tornou extremamente difícil medir diretamente a temperatura.

Uma nova tecnologia que utiliza fibras óticas, foi desenvolvida para a medição da temperatura do gusa direta e imediatamente após ter sido vazado. Esta nova tecnologia **FIMPIT** permite a medição direta do gusa com influência externa mínima na temperatura, causada pela dissipação de calor para a atmosfera e para os canais de corrida.

A **Figura 41** mostra uma representação esquemática do sistema de medição utilizando esta tecnologia.

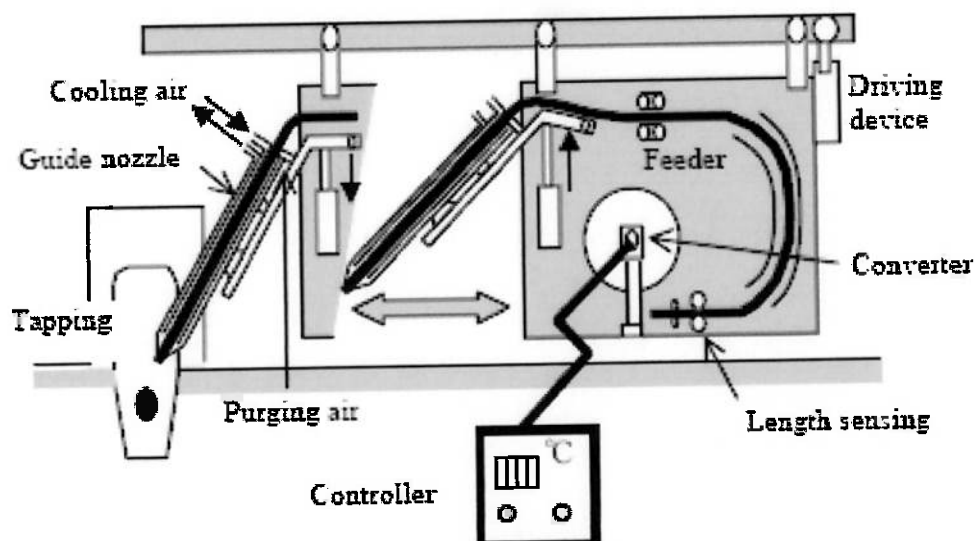


Figura 41 - Diagrama estrutural esquemático do FIMPIT

A **Figura 42** mostra a evolução da temperatura e do silício contido no gusa na usina de Fukuyama. Esta tecnologia foi eficaz na redução da temperatura do gusa em 20 graus e na redução do teor de silício contido no gusa por mais que 0,1%, quando comparado com as operações convencionais.

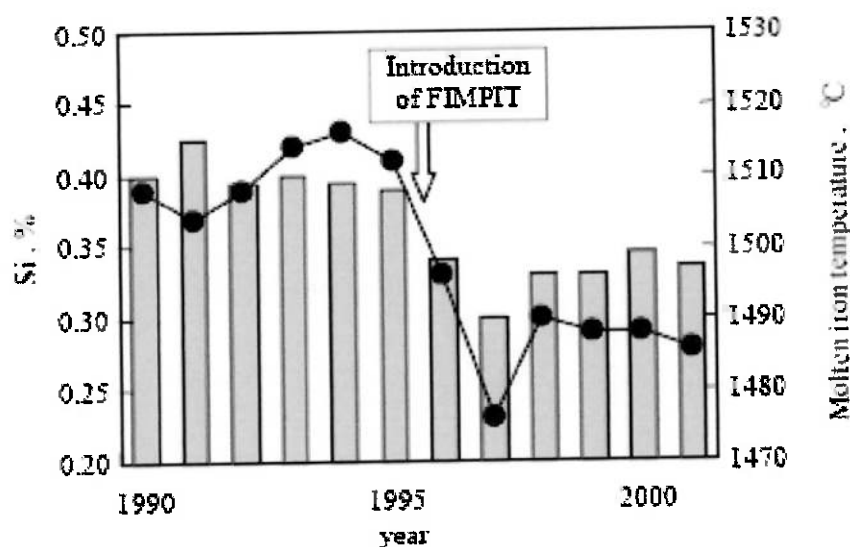


Figura 42 - Evolução operacional antes e depois da implantação do FIMPIT (Fukuyama)

2.4.4.3 Elevação do tratamento de dessiliciação no nível das casas de corrida

O tratamento de dessiliciação nas casas de corrida é geralmente realizado por injeção no gusa de material fluxante dessiliciante na bica basculante , uma vez que neste local existe um favorecimento para o aumento da eficiência da reação. Devido às essas razões, os níveis de dessiliciação tendem a aumentar ainda mais futuramente .

Quando o teor de silício contido é reduzido , é essencial que a quantidade carregada de fluxante dessiliciante seja aumentada. No entanto, o método de carregamento do fluxante na panela de gusa , pode resultar em resultados negativos, como formação de espuma que torna dificultado o carregamento da quantidade correta de gusa na panela .

Nas situações tradicionais , o operador carrega manualmente um fluxante anti-espuma quando esse fenômeno ocorrer .

No entanto, o efeito da supressão da espuma para estes casos , é fortemente dependente da habilidade do operador. O carregamento contínuo do fluxante também é difícil . De forma a garantir o efeito correto da supressão da espuma , o método de carregamento do fluxante anti-espumante para dentro da panela foi aperfeiçoado .

Isso permite a independência das operações do carregamento do fluxante anti-espumante e a injeção do fluxante dessiliciante . O fluxograma do processo já aperfeiçoado é mostrado na **Figura 43** .

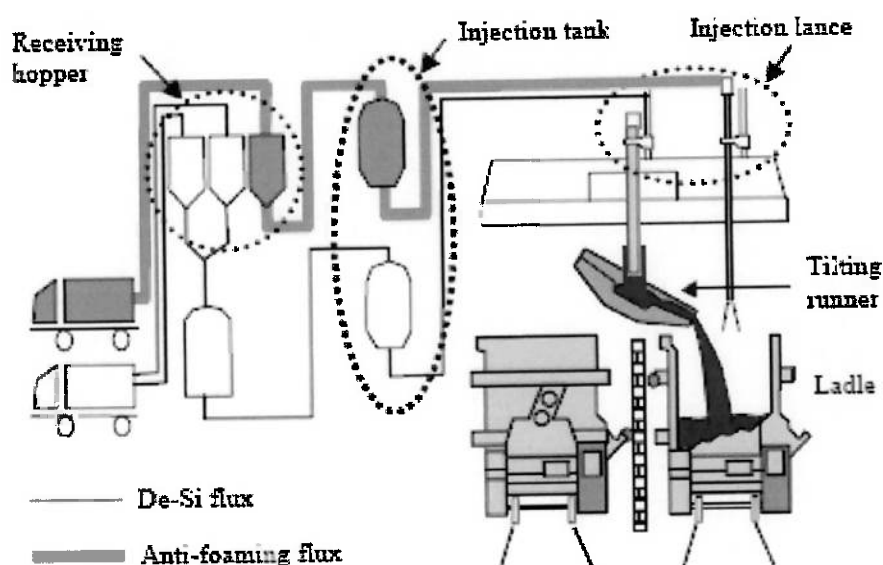


Figura 43 - Fluxograma do novo processo de dessiliciação do gusa

Neste processo, o fluxante anti-espumante é carregado diretamente na panela de gusa e reagindo de forma eficiente, suprimindo a geração do gás CO e que provoca a formação da espuma. Esse processo também permite a injeção estável de grandes quantidades de fluxante dessiliciante, tomando a dessiliciação mais eficiente. Neste processo, o gusa já apresenta o teor contido de Silício bastante baixo, quando ele é enviado para a processo da aciaria, contribuindo para o atendimento de 100% escória zero na operação da aciaria.

2.3 INJEÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS APLICADOS EM ALTOS FORNOS

2.3.1 Teste e experimentos

2.3.1.1 Teste industrial de injeção de plásticos no Alto Forno

Para explicar o comportamento dos resíduos plásticos num Alto Forno, testes de injeção foram realizados no Alto Forno No.1 de Keihin. A **Figura 44** mostra o aparato experimental da injeção de plásticos.

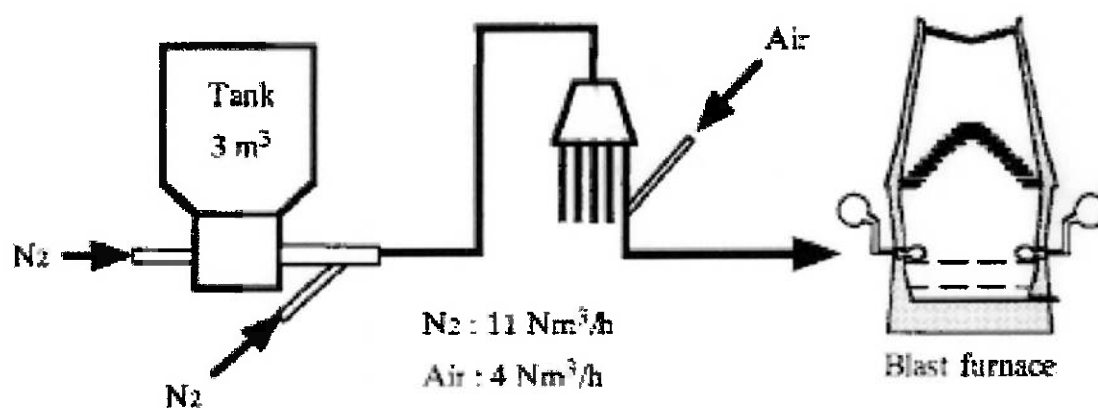


Figura 44 - Equipamentos para injeção experimental de plásticos num Alto Forno .

Os resíduos plásticos foram descarregados a partir de um silo, transportados para um alto forno utilizando nitrogênio e injetado em 5 das 40 ventaneiras do Alto Forno. A taxa de injeção de resíduos plásticos foi de 59,0 kg / min com uma relação em peso de sólido / gás igual a 3,0.

O comportamento da gaseificação e combustão dos resíduos de plásticos imediatamente logo após serem injetados num Alto Forno, foi examinado por uma câmera de alta velocidade e para a amostragem do gás foi usada uma sonda para zona de combustão .

O comportamento durante a injeção de plásticos no forno , foi analisada utilizando uma amostragem do gás , através de uma sonda de alimentação do tipo Vertical (SAV) em frente apenas das ventaneiras com a injeção de plásticos. As principais condições experimentais estão listadas na **Tabela 2**.

Blast		
Temperature	1153 °C	
Tuyere gas velocity	234 m/s	
Plastics		
Preparation	Crushed	Agglomerated
Particle size	0.2-1.0 mm -10.0 mm	-10.0 mm
Injection rate *	59.0 kg/thm	
Fuel equivalence ratio	1.93	
Pulverized coal		
Particle size	-74 μ m, 80 mass%	
Injection rate *	78.4 kg/thm	
Fuel equivalence ratio	2.11	

* Injection rate per one tuyere

Tabela 2 - Condições experimentais da injeção de resíduos plásticos num Alto Forno.

O tamanho do grão dos resíduos plásticos tem uma grande influência sobre o projeto do sistema de injeção , tais como a capacidade da moagem e a condição de transporte.

Por isso o tamanho do grão do plástico foi alterado ; partículas moídas de 0,2 a 1,0 mm e menor que 10,0 mm, e partículas aglomeradas menor de 10,0 mm foram injetadas. Partículas aglomeradas foram feitas por aquecimento a partir de plásticos do tipo filmes .

No que se refere à dureza destas partículas, a partícula moída tem um maior valor do que a da partícula aglomerada. A taxa de substituição de combustível dos resíduos plásticos e do carvão pulverizado são respectivamente 1,93 e 2,11 .

Os detalhes dos métodos de análise são mostrados na **Figura 45** e são os seguintes :

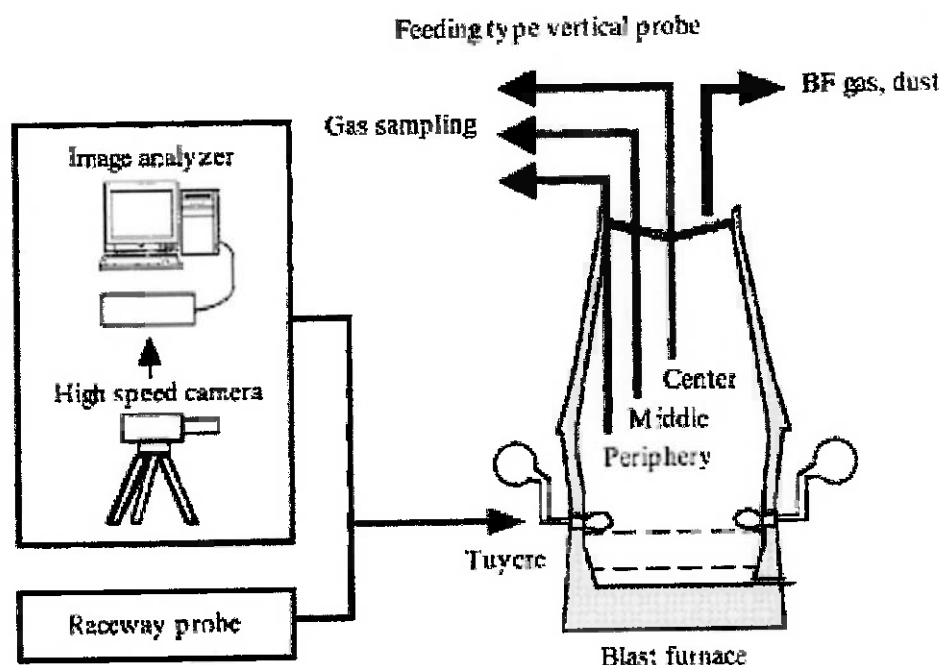


Figura 45 - A análise do comportamento dos resíduos plásticos no Alto Forno.

(1) Análise por uma câmera de alta velocidade

Fotografias foram tiradas a uma velocidade de 1 / 13.500 quadros / segundo , através de um visor de observação em uma ventaneira , para observar o comportamento da combustão dos resíduos de plástico logo após a injeção para o interior do Alto Forno . As fotografias originais foram processadas por um processador de imagem , de modo que os fenômenos da gaseificação e da combustão das partículas de plásticos poderiam ser facilmente verificados.

(2) Amostragem na zona de combustão

A sonda para a zona de combustão foi inserida através da ventaneira para amostragem dos gases gerados no forno. O gás coletado foi analisado para medir a distribuição do gás na zona de combustão .

(3) Amostragem de gás no interior do forno

Os gases gerados no forno durante a injeção de resíduos plásticos foram amostrados em três pontos radiais no forno (central, intermediário e periférico) utilizando a sonda de alimentação do tipo Vertical (SAV).

(4) Análise de gás do topo e do pó gerado no Alto Forno

Para confirmar a decomposição dos resíduos plásticos a luz do hidrocarboneto (C1-C4) e dos teores de alcatrão, o gás do topo e do pó gerado no Alto Forno foram analisados .

2.3.1.2 Experimentos com modelo a quente da Zona de Combustão

Para estimar detalhadamente o fenômeno de gaseificação e da combustão de plásticos na zona de combustão, injeções experimentais foram realizadas utilizando um modelo a quente da zona de combustão .

Este modelo possui uma ventaneira e consiste de coluna de coque empacotados , simulando a região inferior do alto forno e zona de combustão é formada por um sopro de ar quente através de uma ventaneira , sob as mesmas condições de um Alto Forno. Uma sonda pode ser inserida através da parede oposta a partir da ventaneira para a amostragem dos gases e pós gerados e em posições definidas radialmente ao forno.

Além disso, a distribuição de temperatura na zona de combustão foi medida utilizando um termômetro de radiação de fibra ótica, que pode ser usado em altas temperaturas acima de 1 400 ° C .

A eficiência da gaseificação e da combustão dos resíduos de plásticos injetados foi estimada pelo taxa de substituição dos plásticos para o coque .

As principais condições experimentais são listadas na **Tabela 3**. A taxa de substituição de combustível dos resíduos plásticos e do carvão pulverizado são respectivamente 0,70 e 0,78 .

Table 2. Experimental conditions of waste plastics injection in raceway hot model.

Blast Temperature	1200 °C	
Tuyere gas velocity	140 m/s	
Plastics Preparation	Crushed	Agglomerated
Harmonic mean size of particles	0.59 mm	0.85 mm
	1.50 mm	1.66 mm
	3.50 mm	3.10 mm
Injection rate *	150.0 kg/hm	
Fuel equivalence ratio	0.70	
Pulverized coal		
Particle size	-74 μ m, 80 mass%	
Injection rate *	200.0 kg/hm	
Fuel equivalence ratio	0.78	

* Injection rate per one tuyere

Tabela 3. Condições experimentais de injeção de resíduos plásticos no modelo a quente da zona de combustão .

2.3.2 Resíduos plásticos

2.3.2.1 Observação direta dos resíduos injetados na zona de combustão

Para fins de comparação, a figura também mostra uma análise fotográfica do carvão pulverizado (menor que 74 microns , 80% de massa), que é normalmente utilizado como combustível . Resíduos plásticos num tamanho na faixa de 0,2 a 1,0 milímetros teve um comportamento semelhante ao do carvão pulverizado, o que mostra que os resíduos plásticos deste tamanho foram instantaneamente gaseificados e queimados no ponto de injeção. Por outro lado, os plásticos moídos com um tamanho menor que 10,0 mm e os plásticos aglomerados de mesmo tamanho , injetado no forno indicaram combustão inativa .

A **Figura 46** mostra as fotografias imediatamente após a injeção na zona de combustão .

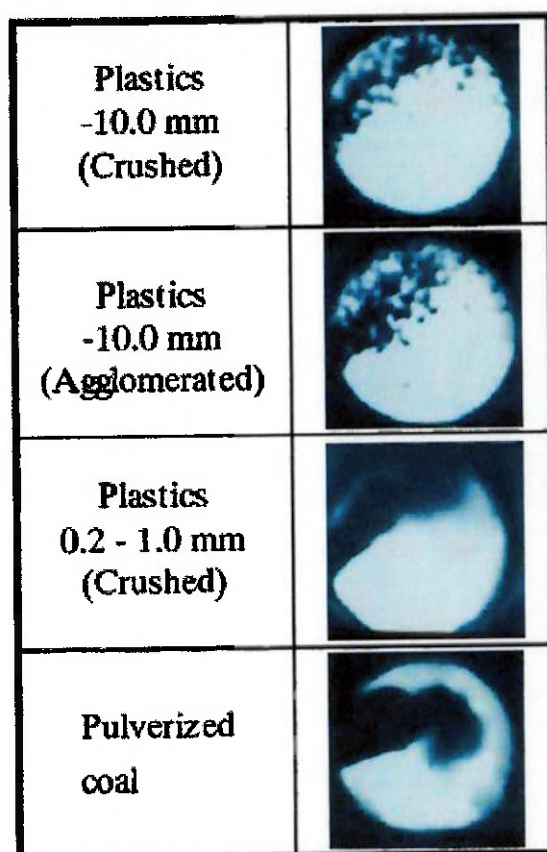


Figura 46 - Fotografias em alta velocidade das partículas injetadas no Alto Forno.

O processamento de imagens foi aplicado para essas fotografias , para esclarecer as características da gaseificação e da combustão . A fotografia foi analisada utilizando um processador de imagens , que divide o brilho da imagem em 255 tonalidades .

Nas imagens analisadas, as áreas com 0-25, 25-50, 50-170 e 170-255 foram consideradas como sendo : região da lança de injeção, região dominante do pré-aquecimento de partículas(B), região dominante da combustão das partículas (A) e o interior do forno , respectivamente, tendo como base a imagem analisada da condição de operação apenas com coque (all coke) e do resultado da observação das imagens durante a injeção do carvão pulverizado.

Estas definições são mostrados na **Figura 47**.

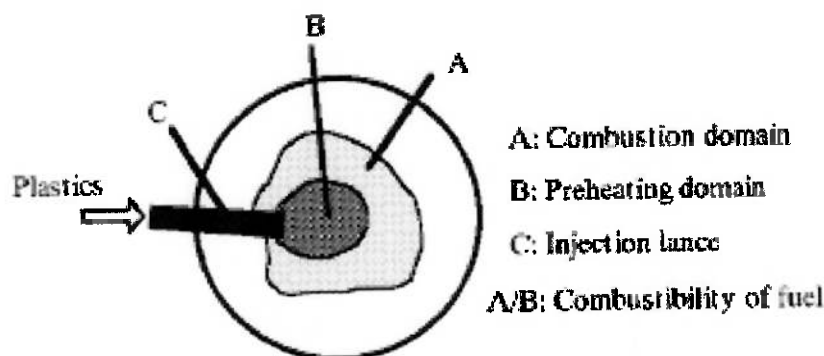


Figura 47 - Análise do método das fotografia em alta velocidade.

Valores mais elevados para a relação de área A/B , entre a região dominante de combustão e de pré-aquecimento, sugerem uma melhor combustibilidade.

A flutuação ativa relação de área A/B com o tempo de processo indica que a gaseificação e a combustão dos combustíveis estão num estado ativo.

A **Figura 48** mostra as mudanças relação de área A/B , com o tempo de processo.

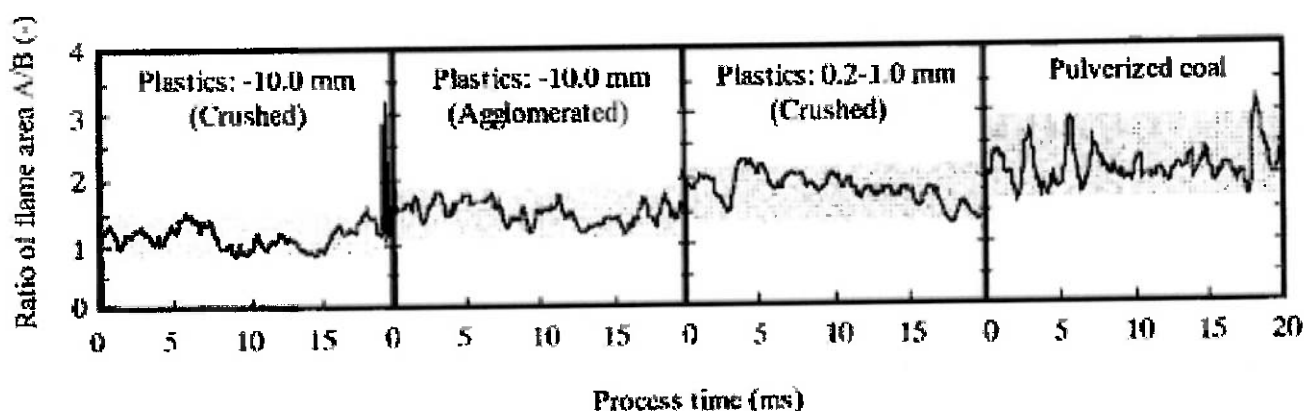


Figura 48 - Efeito do combustível injetado na Figura 46, na flutuação da área da chama, observado com fotografias em alta velocidade .

A combustibilidade dos resíduos plásticos é inferior à do carvão pulverizado. A magnitude da flutuação da relação de área é em pequena escala, no caso dos resíduos de plásticos em comparação com carvão pulverizado, indicando que a

pirólise e combustão na superfície dos resíduos plásticos não foram ativadas. Plásticos com o tamanho de grão variando , de 0,2 a 1,0 milímetros obteve a relação de área mais elevada em comparação com o tamanho menor que 10,0 mm.

Estima-se que o plástico aglomerado apresenta uma combustibilidade um pouco mais elevada do que para os plásticos moídos , apesar de mesmo diâmetro de partícula . Além do tamanho das partículas, o método de preparação de moagem ou de aglomeração , influencia diretamente a combustibilidade devido à sua dureza.

2.3.2.2 Reatividade dos resíduos não queimados (Char) dos Plásticos

Os plásticos aglomerados com um tamanho de 3,10 milímetros tem cerca de 80% de eficiência. A partir deste resultado, considera-se que a geração dos resíduos não queimados (char) oriundos a partir dos plásticos , acumula no Alto Forno e, eventualmente podendo causar problemas de permeabilidade.

Desta forma , a reatividade dos resíduos não queimados (char), provenientes dos plásticos , com a reação "solution loss" requer uma atenção especial. Na sequencia, a reatividade dos resíduos não queimados (char), foi medida através da utilização de uma termobalança para a análise.

Os resíduos não queimados (char), provenientes dos plásticos , foram preparados pela coqueificação dos resíduos plásticos em atmosfera de gás nitrogênio a 1 000 ° C.

A **Figura 49** mostra a taxa de gaseificação de CO₂ do char provenientes dos resíduos plásticos.

Como referência, também os resultados do char derivados do carvão pulverizado são mostrados na **Figura 49**.

O char provenientes dos resíduos plásticos e do carvão pulverizado testado , está com um tamanho respectivamente , na faixa de 0,4 a 0,5 mm e 0,05 mm .

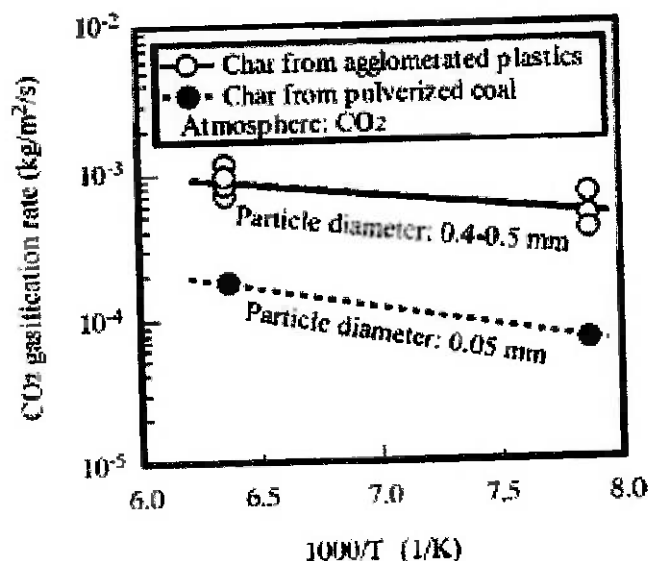


Figura 49 - Taxa de gaseificação de CO₂ do char provenientes dos resíduos plásticos.

De acordo com os resultados, a taxa de gaseificação de CO₂ do char provenientes dos resíduos plásticos, foi 10 vezes maior em comparação com a taxa do carvão pulverizado, embora o diâmetro das partículas do char dos resíduos plásticos foi 10 vezes maior do que a partir do char do carvão pulverizado.

A reatividade do carbono com CO₂ e H₂O é não apenas dependente da área da superfície, mas também a sua estrutura. Este resultado sugere que a estrutura do char provenientes dos resíduos plásticos é composta por uma textura isotrópica, com atividade elevada ao CO₂.

A partir desta constatação, conclui-se que o resíduo não queimados (char) proveniente dos resíduos plásticos podem ser facilmente consumido no Alto Forno

2.3.3 Fenômenos

2.3.2.2 Fenômenos internos do Alto Forno durante a Injeção de Plásticos

A **Figura 50** mostra a concentração de hidrogênio e a concentração de hidrocarbonetos C1-C4 , amostradas pela sonda SAV em pontos central, intermediário e periférico , ao longo do raio no interior do forno , durante a injeção de resíduos plásticos de diferentes tamanhos.

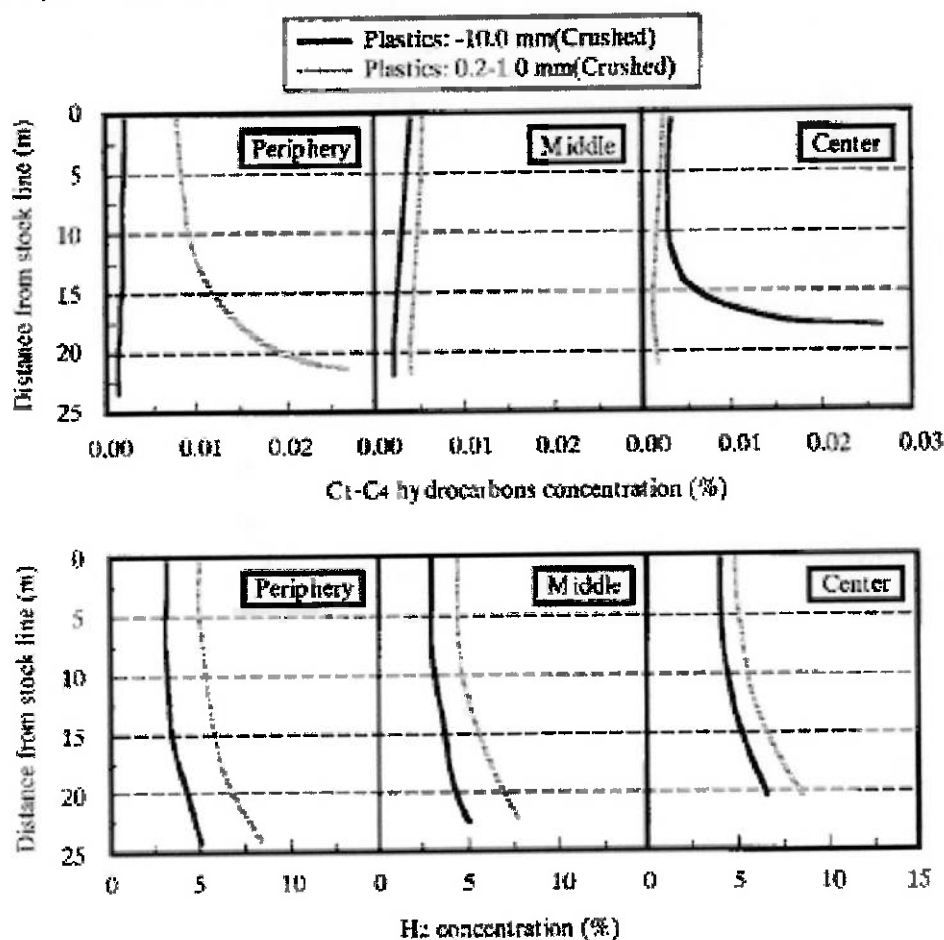


Figura 50 - Concentração de hidrocarbonetos C1-C4 e de H2 no interior do forno , durante a injeção de plásticos.

Para os resíduos plásticos com o tamanho variando de 0,2 a 1,0 mm, a concentração de hidrocarbonetos C1-C4 na periferia do Alto Forno foi mais elevada do que no centro.

Para os resíduos de plásticos com um tamanho menor que 10,0 mm, pelo contrário foi observada a tendência oposta de concentração de hidrocarbonetos C1-C4, ou seja, a sua concentração no centro era mais elevada do que na periferia. Com relação a concentração de hidrogênio no forno durante a injeção de plásticos com um tamanho de 0,2 a 1,0 mm, indica um mesmo nível de concentração no centro, periferia e na intermediária do Alto Forno .

Para os plásticos com um tamanho menor que 10,0 mm, a concentração de hidrogênio no centro tornou mais elevada do que a da intermediária e da periferia. Em comparação com a injeção de plásticos de 0,2 a 1,0 mm e menor que 10,0 mm , a diferença da concentração de hidrogênio na periferia do forno foi maior do que a do centro .

Estes resultados sugerem que as posições de gaseificação e de combustão dos resíduos plásticos na zona de combustão variam com o tamanho da partícula.

Diante deste fato , os hidrocarbonetos C1-C4 foram detectados no gás interno do forno , durante a injeção de plásticos, se receiam que os compostos de alcatrão , poderão se aderir nas tubulações altos fornos , serão originados possivelmente devido à decomposição de plásticos no forno. Então , a concentração de hidrocarbonetos C1-C4 e teores de alcatrão e pó contido no gás topo do Alto Forno foram medidos. A **Figura 51** mostra a concentração de hidrocarbonetos C1-C4 , no gás do topo do Alto Forno.

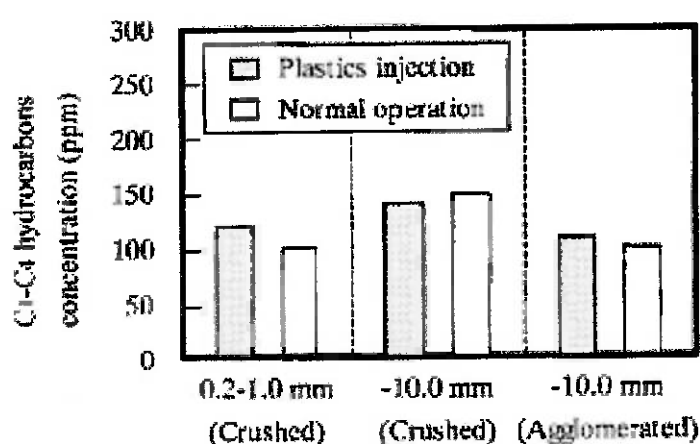


Figura 51 - Concentração de hidrocarbonetos C1-C4 no gás do topo do Alto Forno durante a injeção de plásticos.

Assim como mostrado na **Figura 51** a concentração de hidrocarbonetos leves, como os hidrocarbonetos C1-C4 durante a injeção de plásticos foi igual a da operação normal (injeção de carvão pulverizado).

Especialmente, os Hidrocarbonetos C1-C4 detectados, quase sempre CH₄, e os hidrocarbonetos C2-C4, devido a decomposição dos plásticos foi insignificante em todos os casos de injeção de plásticos com tamanho de 0,2 a 1,0 mm e menor que 10,0 mm.

A **Figura 52** mostra os teores de alcatrão no pó dos altos fornos durante a injeção de plásticos.

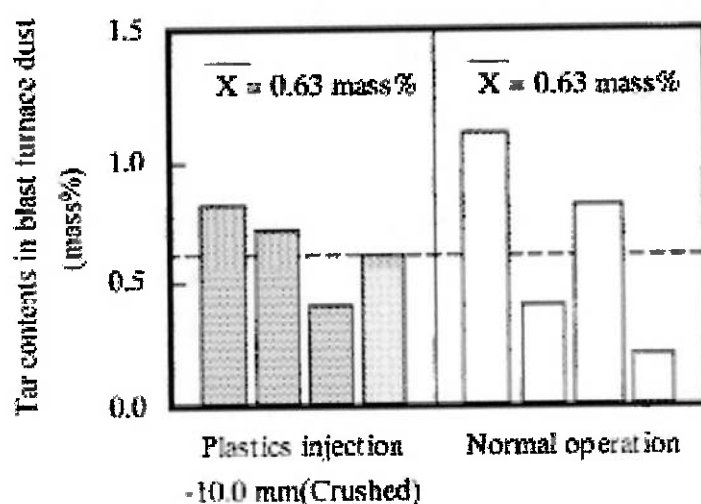


Figura 52 - Teores de alcatrão no pó de Altos Fornos durante a injeção de plásticos e em operação normal .

O alcatrão dissolvido em tolueno no pó de Altos Fornos foi mensurado. Os teores totais contido no alcatrão durante a injeção de plásticos foram os mesmos que, os de durante a injeção de carvão pulverizado. Por isso, foi confirmado que o problema dos resíduos de alcatrão aderidos a partir da decomposição dos plásticos foi a menor possível.

2.3.3.2 Influência do tamanho do grão dos plásticos nos Fenômenos internos do Alto Forno

A partir dos resultados dos testes de injeção de plásticos no processo industrial do Alto Forno , no caso do plástico fino com tamanho variando de 0,2 a 1,0 mm, o gás hidrogênio oriundo da decomposição dos plásticos foi detectada principalmente na periferia, em comparação com o tamanho menor que 10,0 milímetros. Além disso, a distribuição da concentração dos hidrocarbonetos C1-C4 oriundos da decomposição de plásticos no raio do forno , durante a injeção de plásticos com um tamanho de 0,2 a 1,0 mm foi muito diferente daquela , com um tamanho menor que 10,0 mm . Por conseguinte, estimou-se que os plásticos finos foram presumivelmente queimados, na frente da ventaneira , gerando gases redutores . Por outro lado, resíduos de plásticos mais grossos com um tamanho menor que 10,0 milímetros iniciaram a gaseificação e a combustão em regiões profundas da zona de combustão . O comportamento da gaseificação e da combustão , afetadas pelo tamanho do grão do plástico , tem uma influência sobre o fluxo gasoso gerado da injeção das matérias plásticas . Esse comportamento pode ser representado esquematicamente como mostrado na **Figura 53**.

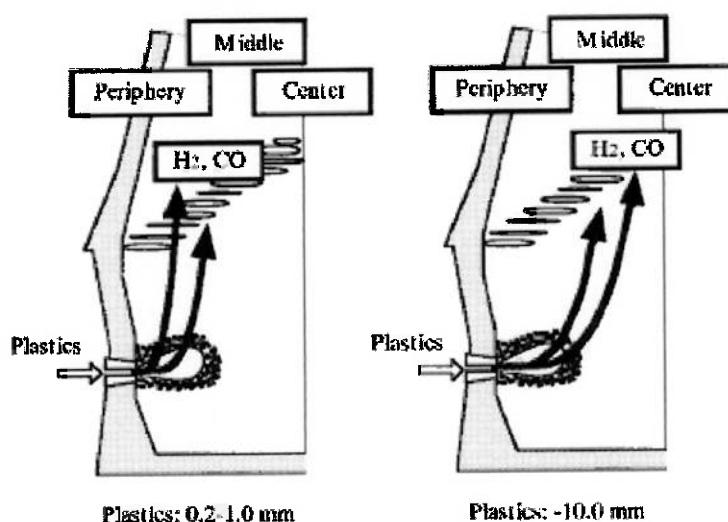


Figura 53. O fluxo do gás gerado a partir da injeção de plástico no Alto Forno

2.3.3.3 Alteração dos fenômenos da zona de combustão pela injeção de plásticos

Com o objetivo de analisar a alteração dos fenômenos da zona de combustão durante a injeção de plásticos, a composição do gás na zona de combustão para vários tamanhos de plásticos foram medidos.

A **Figura 54** mostra a distribuição da composição de gás na zona de combustão durante a injeção de plásticos no modelo a quente da zona de combustão. Como referência, esta figura também mostra os valores dos resultados da injeção de carvão pulverizado e da operações apenas com coque (all coke).

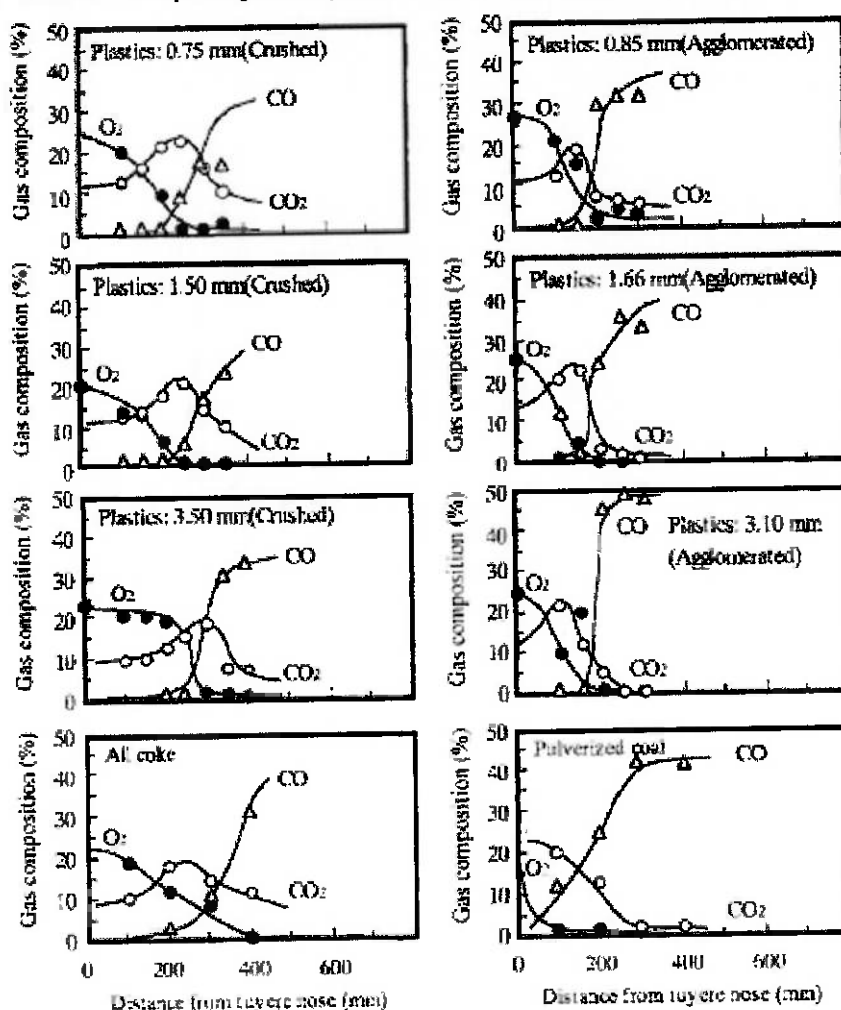


Figura 54 - Alterações da composição de gás na zona de combustão durante a injeção de plásticos no modelo a quente da zona de combustão.

Tal como demonstrado na **Figura 54**, a distribuição da composição do gás durante a injeção de plásticos foi basicamente similar a encontrada na operação apenas com coque (all Coke). No caso da injeção de carvão pulverizado, o oxigênio foi rapidamente consumida na frente da ventaneira . Este comportamento é semelhante ao que ocorre no Alto Forno como mostrado anteriormente .

No que se refere ao método de preparação dos resíduos de plástico, para o caso dos resíduos plásticos moídos , picos de concentração de CO₂ foram localizados na região entre 200 e 300 milímetros a partir do bico da ventaneira . Além disso, o pico foi deslocado para a região profunda , a partir do bico da ventaneira , com um aumento do diâmetro das partículas .

Por outro lado, para o caso dos resíduos plásticos aglomerados , a posição do pico de concentração de CO₂ , foi localizado na região entre 100 e 150 milímetros , a partir do bico da ventaneira. Então, uma mudança nos picos de concentração de CO₂ , por conta da diferença de diâmetro da partícula dos plásticos não foi claramente percebido.

A **Figura 55** mostra a temperatura máxima a partir do ponto do bico da ventaneira , medida pela fibra ótica . Normalmente, é muito difícil se medir a temperatura na zona de combustão no entanto , a fibra ótica baseada no termômetro de radiação , possibilita medir diretamente a temperatura dos gases acima de 1 400 ° C .

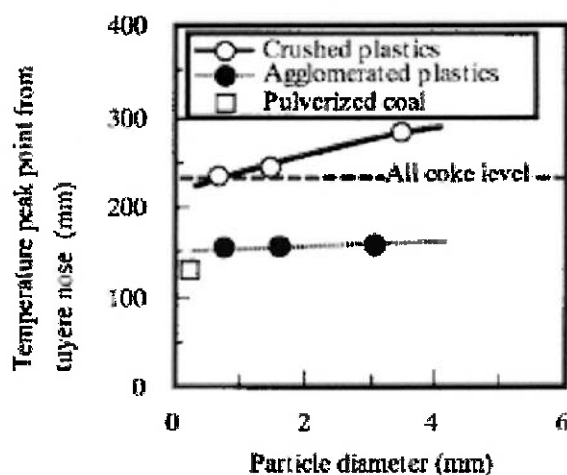


Figura 55 - Temperatura máxima no ponto do bico da ventaneira na zona de combustão , durante a injeção de plásticos.

O ponto de temperatura máxima indica o foco da combustão , onde a reação de combustão prossegue no seu estado mais ativo . De acordo com a **Figura 55** , a tendência da condição para cada ponto de temperatura máxima , é semelhante ao ponto de concentração máxima de CO₂.

No caso dos plásticos grossos moídos, o foco da combustão chega mais próximo do bico da ventaneira , com a diminuição do tamanho da partícula. A partir desses resultados nas **Figuras 54 e 55**, foi sugerido que o comportamento da gaseificação e da combustão dos plásticos na zona de combustão , dependeu não só do tamanho dos plásticos, mas também do método de preparação .

2.3.4 Gaseificação e Combustão

2.3.4.1 Comportamento da Gaseificação e da Combustão dos Plásticos na zona de combustão .

A **Figura 56** mostra a alteração na concentração de oxigênio na zona de combustão durante a injeção de plásticos com um tamanho menor que 10,0 mm, no processo industrial do Alto Forno .

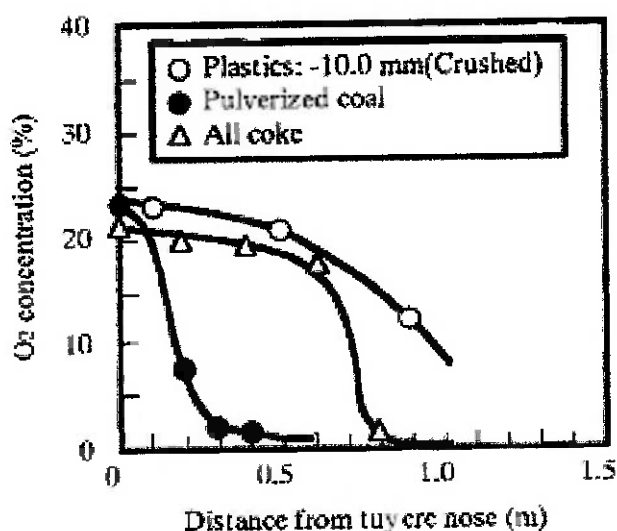


Figura 56. Alteração na concentração de O₂ na zona de combustão , durante a injeção de plásticos nos Altos Fornos (processo industrial)

Como referência, a figura também mostra os resultados na operação apenas com coque (all coke) e na injeção de carvão pulverizado. Para o caso da injeção de carvão pulverizado, a concentração de oxigênio na zona de combustão rapidamente diminui na frente da ventaneira .

Por outro lado, para a injeção de resíduos plásticos, concentração de oxigênio foi gradualmente decrescente . Esta mudança é semelhante para a operação apenas com coque (all coke).

Estes resultados sugerem que a combustibilidade dos plásticos é inferior a do carvão pulverizado.

2.3.4.2 Eficiência da Gaseificação e Combustão dos Plásticos

A **Figura 57** mostra a relação entre a eficiência da gaseificação e da combustão de resíduos plásticos e o diâmetro partícula dos plásticos.

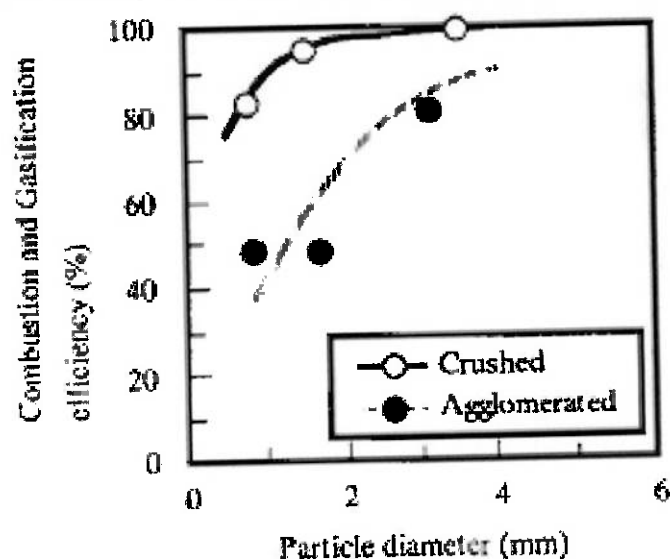


Figura 57. Efeito do diâmetro partícula dos plásticos eficiência da gaseificação e da combustão

A eficiência da gaseificação e da combustão destes resíduos plásticos , aumenta com o aumento de diâmetro das partículas .

Para o caso dos plásticos aglomerados com uma dimensão de 3,10 milímetros , o seu rendimento foi de cerca de 80% . Considerando que, os plásticos moídos com um tamanho de 3,50 milímetros , atingiram quase 100% de eficiência .

Estes constatação é basicamente diferente do comportamento do carvão pulverizado que é normalmente utilizado como combustível . No caso do carvão pulverizado, a eficiência da combustão diminuiu com um aumento do diâmetro da partícula .

Pelo lado oposto, os plásticos com partículas grossas mostram uma maior eficiência da gaseificação e da combustão do que os plásticos de partículas finas. Além disso, a eficiência da gaseificação e da combustão dos plásticos aglomerados como um todo , foi menor que a dos plásticos moídos , apesar de serem partículas de mesmo diâmetro.

Estas diferenças sugerem que a propriedade da partícula dos plásticos moídos diferem da partícula dos aglomerados , apesar da composição química tanto dos plásticos moídos , como a dos plásticos aglomerados serem quase a mesma .

2.3.4.3 Mecanismos de Gaseificação e de Combustão dos plásticos

A taxa de combustão dos plásticos não é ativa , comparando-se com a do carvão pulverizado, no entanto, os hidrocarbonetos C1-C4 e os compostos de alcatrão , devido aos plásticos decompostos encontrados no gás e nos pós do gás do topo do Alto Forno, foram os mesmos que a da operação com carvão pulverizado . Estima-se que o mecanismo de gaseificação e de combustão dos plásticos mais grossos na zona de combustão era diferente da do plástico fino e do carvão pulverizado.

Esse resultados no modelo a quente da zona de combustão , mostrou que a tendência de gaseificação e combustão do plástico se tornou mais eficiente com o aumento do diâmetro da partícula dos plásticos. Foi confirmado que o tempo de permanência das partículas grossas zona de combustão aumentou com o aumento do diâmetro da partícula . Resumidamente , as partículas grossas podem se manter por um período de tempo mais longo na zona de combustão .

O mecanismo de gaseificação e combustão dos plásticos na zona de combustão pode ser representado como mostrado na **Figura 58**.

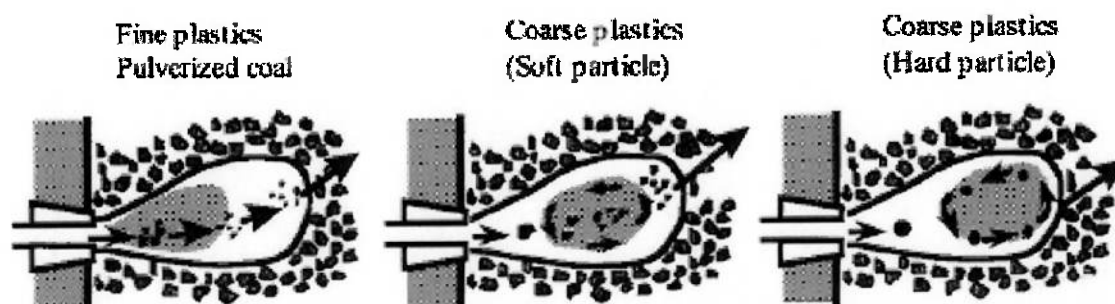


Figura 58 - Comportamento da gaseificação e combustão dos resíduos plásticos na zona de combustão .

Com relação as propriedades dos resíduos plásticos, a eficiência da sua gaseificação e da sua combustão , depende dos métodos de preparação dos resíduos plásticos.

A eficiência da gaseificação e da combustão dos plásticos moídos , se tornou superior que a dos plásticos aglomerados, embora os plásticos aglomerados foram melhores em relação a combustibilidade quando comparados com os plásticos moídos .

A eficiência da gaseificação e da combustão dos plásticos grossos moídos na zona de combustão chegaram a cerca de 100%, enquanto a eficiência dos plásticos grossos aglomerados chegou a cerca de 80%. A partir da observação das partículas de plásticos seção da tubulação de sopro no modelo a quente da zona de combustão, para os plásticos aglomerados , o tamanho da partículas a 900 mm do ponto de injeção , foi menor do que no ponto de injeção . Por outro lado, para os plásticos moídos , a alteração da dimensão das suas partículas não foi observada na seção da tubulação de sopro.

Foi registrado que as partículas plásticas grossas foram divididas em partículas menores devido ao rápido aquecimento . Por conseguinte, estima-se que os plásticos grossos aglomerados foram facilmente desintegrados em partículas finas

na zona de combustão , devido ao choque térmico, como mostrado na **Figura 58**, porque os plásticos aglomerados foram gerados pelo aquecimento a partir de plásticos do tipo-filme . Por outro lado, plásticos moídos foram oriundos , de partículas com característica de dureza, provenientes a partir de plásticos sólido. Tendo como resultado, as partículas desintegradas a partir dos plásticos aglomerados , apresenta similaridade com a propriedade de combustibilidade das partículas finas. Portanto, conclui-se que o comportamento dos plásticos aglomerados é diferente dos plásticos moídos .

2.3.5 Estimativa da taxa máxima de injeção de plásticos

A partir dos resultados a injeção de plásticos aglomerados no modelo a quente da zona de combustão, considera-se que o resíduo não queimados (char) é gerado a partir de injeção maciça de plásticos, devido a desintegração dos plásticos aglomerados em partículas finas devido ao choque térmico. Por isso, a eficiência da gaseificação e da combustão no Alto Forno foi estimada num modelo matemático . A partir dos resultados sobre a eficiência da gaseificação e da combustão do plástico aglomerado , o volume de resíduo não queimado (char) geradas a partir da zona de foi calculado como mostrado na **Figura 59** .

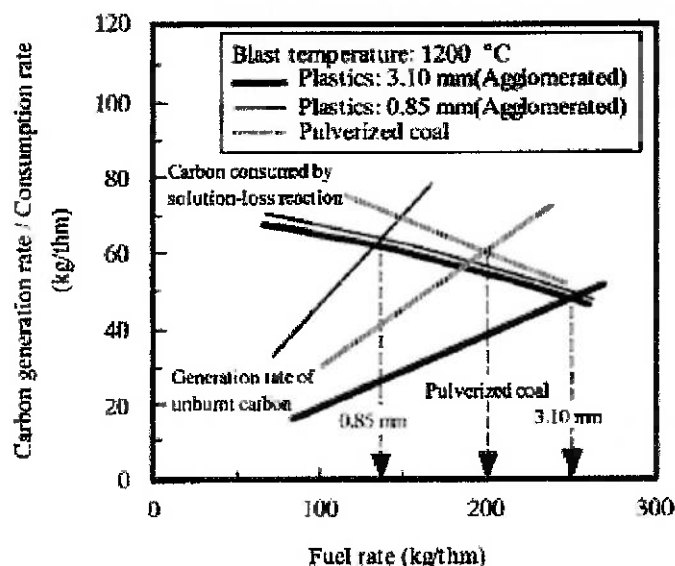


Figura 59 - Estimativa da taxa máxima injeção de plásticos cálculo baseado na geração de resíduo não queimados (char) e pela reação de solution loss .

Além disso, a quantidade de carbono consumidos pela reação de solution loss para cada nível de fuel rate foi calculado pela conhecido Diagrama Rist . Assumindo que o char foi consumido apenas pela reação solution loss , o ponto onde cruza a quantidade de resíduo não queimado char e o carbono da reação solution loss , representa o limite superior do fuel rate injetado, o fuel rate máximo varia de acordo com diâmetro da partícula dos plásticos .

Portanto, estima-se ser respectivamente, de 140 e 250 kg / t gusa , para o tamanho de 0,85 mm e 3,10 mm dos resíduos plásticos aglomerados. A partir destes resultados, foram as partículas grossas dos plásticos , consideradas as mais adequadas para uma taxa elevada de injeção no Alto Forno. Além disso, somando-se ao dimensionamento dos plásticos, deve ser dada uma atenção especial ao método preparação dos plásticos.

2.3.6 Processo de reciclagem comercial de resíduos plásticos para o sistema do Alto Forno

A partir dos resultados acima de injeção de resíduos de plásticos, o sistema de reciclagem de resíduos plásticos foi instalado na usina de Keihin em outubro de 1996 como mostrado na **Figura 60**.

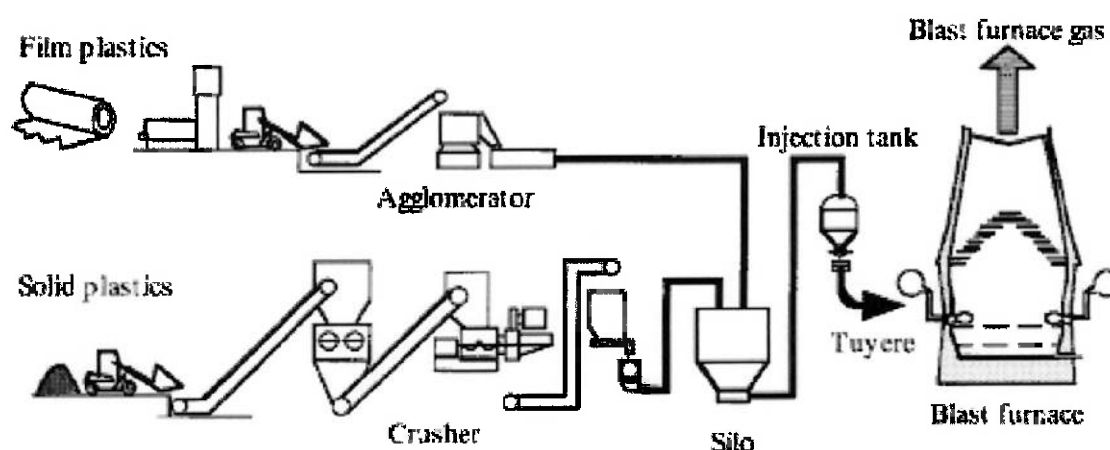


Figura 60 - Sistema de reciclagem dos resíduos plásticos em Alto Forno.

Atualmente, a Kankyo executa o tratamento e a transformação em produto do material plástico usado como vasos e embalagem, a NKK adquire esse produto recomercializado e consome como material redutor no Alto Forno .

A instalação tem uma capacidade de tratamento anual de 30 000 toneladas de resíduos industriais plásticos como : polietileno, polipropileno e poliestireno, excluindo o cloreto de polivinil. O cloreto de polivinil não pode ser utilizado no Alto Forno, devido à sua acidez provocando a das linhas de utilidades do Alto Forno . O sistema de reciclagem de resíduos plásticos consiste da preparação das matérias-primas de vários resíduos plásticos até a injeção no sistema do Alto Forno.

Na preparação da matéria-prima a partir de resíduos de plástico , os plásticos recolhidos são processados em duas linhas de filmes e sólidos. Os filmes plásticos são recuperados e separados , em seguida são fundidos e aglomerados por intermédio de aquecimento, enquanto os plásticos sólidos são moídos.

A **Figura 61** mostra o esquema da linha usada para a preparação do resíduo plástico, que tem por objetivo transformá-lo no tamanho apropriado para ser injetado na região das ventaneiras do Alto Forno. Como se pode observar, essa linha aceita resíduos plásticos em geral, processando tanto garrafas como filmes .

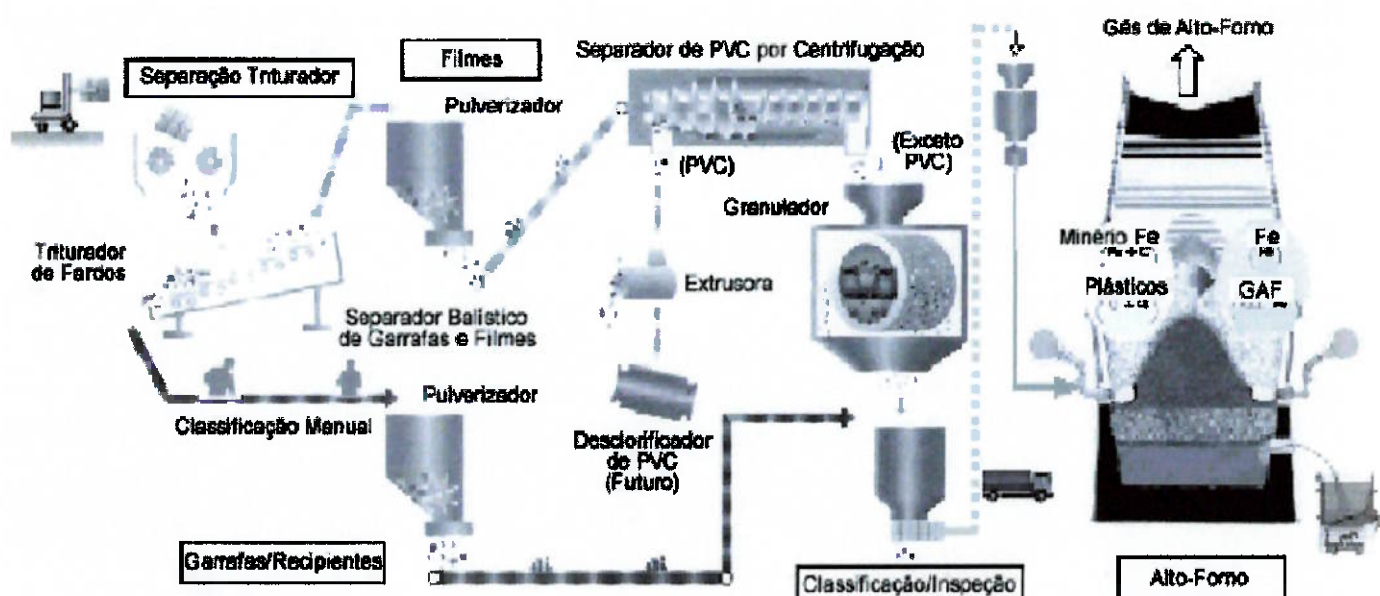


Figura 61 - Linha para preparação de resíduos plásticos recebidos , tanto na forma de garrafas como de filmes, transformando-a em grãos no tamanho apropriado para ser injetado no Alto Forno.

A **Figura 62** mostra esquematicamente como é feita a injeção dos grãos de resíduo de plástico no Alto Forno. Eles são armazenados num silo, sendo dele retirados na forma de uma mistura fluida com ar , que permite seu transporte pneumático até o Alto Forno. A mistura de ar mais plástico é introduzida numa ventaneira do Alto Forno utilizando-se uma lança apropriada .

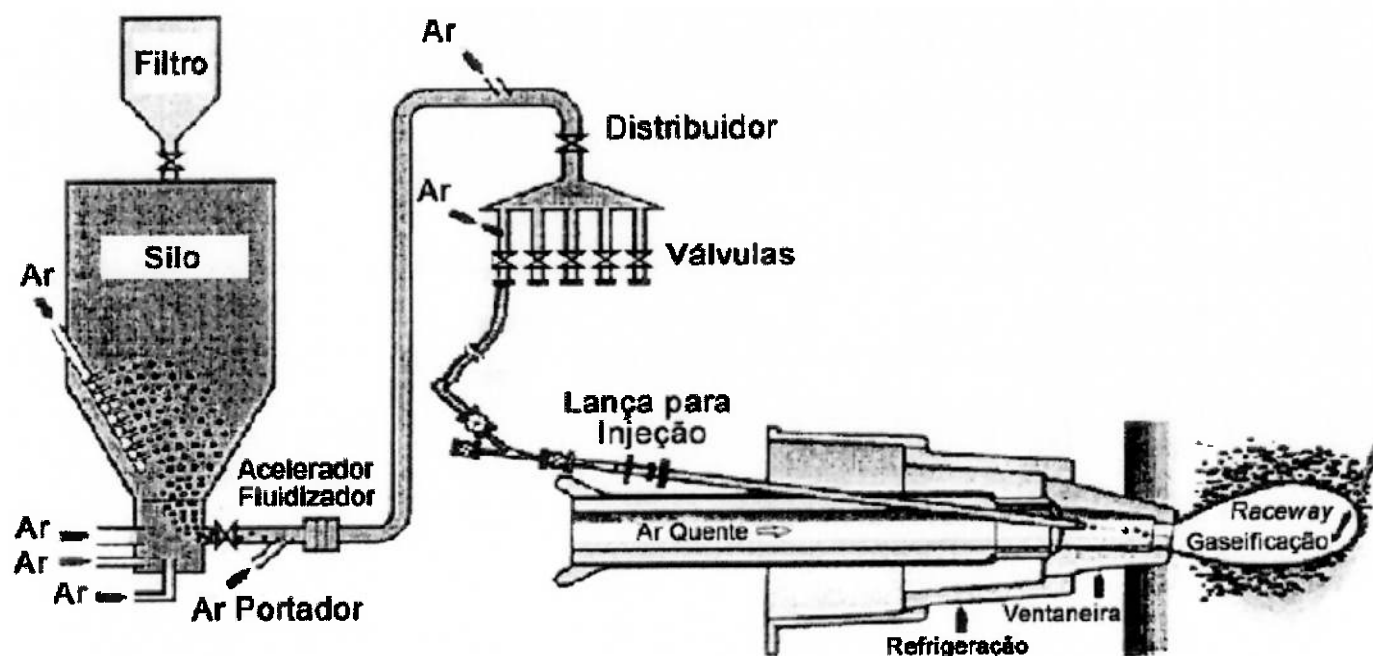


Figura 62: Esquema da injeção da mistura de ar mais grãos de resíduos plásticos no Alto Forno

O sistema da NKK é constituído em processo de fusão e descloração do material plástico usado como vasilhames e embalagens, e um processo de moagem.

Em primeiro lugar, faz o aquecimento e fusão do material plástico misturado, em seguida é descloretado e misturado, e depois é resfriado e solidificado.

A referida técnica possibilitou fabricar o material plástico pulverizado com diâmetro de produto de 200 a 400 μm , conforme a pulverização do material plástico fragilizado no processo de tratamento térmico. (anteriormente, o diâmetro de partícula do material plástico usado que foi granulado e moído em escala industrial foi acima de 1mm.)

O material plástico fabricado em moído apresenta alta reatividade dentro do Alto Forno, comparando com a partícula de plástico consumido anteriormente. E como se utiliza no alto forno em função de material redutor, pode contribuir na racionalização de consumo de energia e na redução de emissão do CO_2 (o seu detalhamento pode ser visto na Figura 63).

Fig 63 PLANTA APR – FLUXOGRAMA
Advanced Plastic Recycling

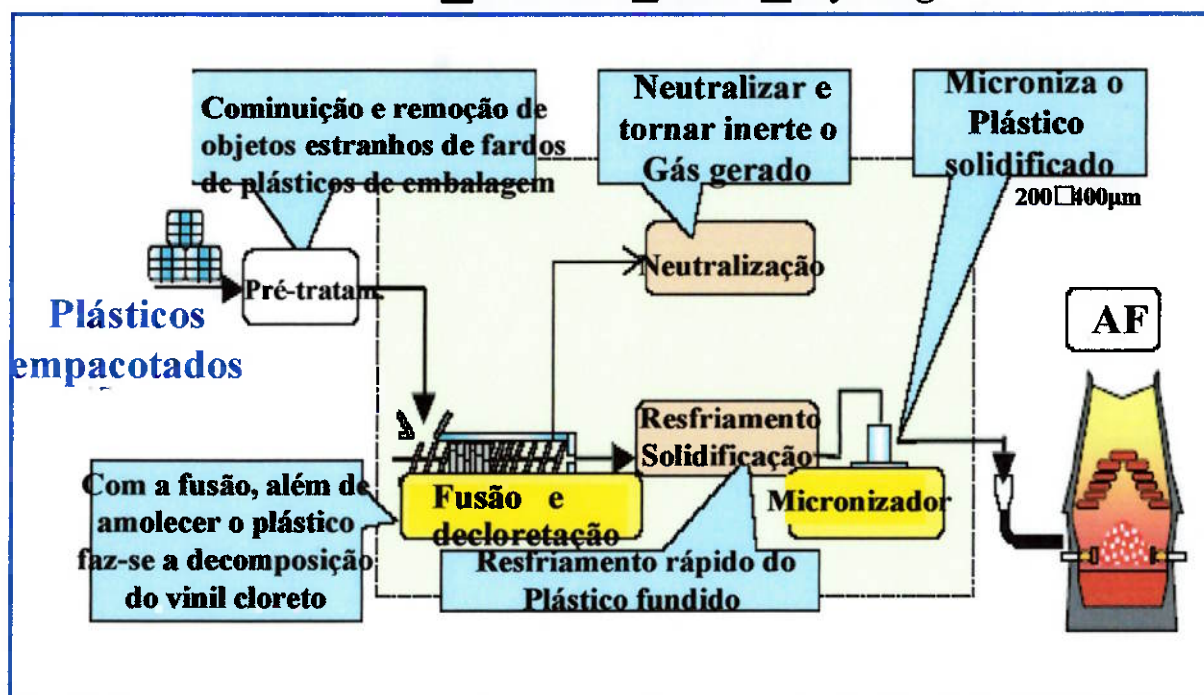


Figura 63 - Fluxo resumido da usina APR da NKK

Características básicas da usina da NKK

Capacidade : aproximadamente 80.000 toneladas ao ano.

Especificação do produto injetado : diâmetro de partícula plástica 200 ~ 400 micron.

Montante de investimento para equipamentos : cerca de 1,4 bilhões ienes
ou 12,1 milhões de dólares

Início de operação : Março de 2007

Localidade : Usina siderúrgica de KEIHIN (Região Leste do Japão)

Algumas fotografias do novo investimento da NKK , poderão ser observadas por intermédio das **Figuras 64 a 66** abaixo .



Figura 64 - Vista geral da usina APR da NKK



Figura 65 - Unidade de fusão e descloretação



Figura 66 - Unidade de tratamento para neutralização

Tendo em vista os excelentes resultados obtidos até a presente data , associado as pressões ambientais cada vez maiores , não é surpresa constatar que a reciclagem de resíduos plásticos através da injeção desse material em Alto Forno vem crescendo ano após ano.

Conforme mostra a **Figura 67**, a quantidade injetada desse material nos Altos Fornos da NKK elevou-se de 5.000 t/ano em 1996 para 110.000 t/ano em 2001.

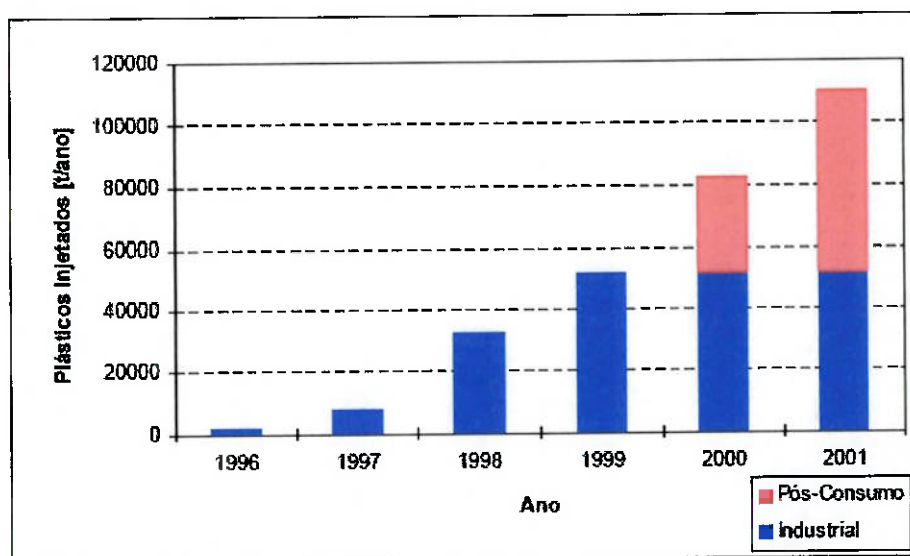


Figura 67 - Evolução da quantidade anual de resíduos plásticos injetados nos Altos Fornos da NKK

Este gráfico também mostra um fato interessante: inicialmente o resíduo de plástico injetado era exclusivamente proveniente dos rejeitos de plástico das linhas de produção, mas a partir de 2000 iniciou-se o processamento de plástico pós-consumo oriundo do sistema público de coleta seletiva de lixo. Já em 2001 essa segunda origem representou a metade de toda a quantidade do plástico injetado nos Altos Fornos da NKK.

3 CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho de final de curso , podemos chegar as seguintes conclusões :

- (1) O processo de Alto Forno tem mostrado por si mesmo , uma habilidade de se adaptar a constante mudança ao longo do tempo , em termos de matéria prima e recuperação de energia. Esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento tem proporcionado estabilidade ao processo e capacidade de atingir alta performance , mesmo sob condições operacionais adversas e com variações mais rigorosas.
- (2) Os exemplos mundiais das Empresas “Paul Wurth” e “NKK” , se mostraram capazes de manter as respectivas tradições de inovação e atendimento as mais diferentes demandas de seus clientes e parceiros , a nível local e mesmo global.
- (3) As novas tecnologias apresentadas neste trabalho , podem e devem ser implementadas rapidamente , nas Empresas Siderúrgicas brasileiras , de modo a acompanhar o estado da arte mundial , levando em conta atender principalmente os pré-requisitos de elevada produtividade , baixo consumo de combustível e operação ambientalmente correta .
- (4) O caso particular da injeção de materiais nas ventaneiras foi aprofundado , sendo que dentre as possibilidades , a Injeção de Plásticos na forma de combustível é uma contribuição que vem se revelando cada vez mais importante , pois esta alternativa viabiliza o uso sustentado do plástico como material, permitindo ainda que se reduza o custo operacional das Empresas Siderúrgicas ao mesmo tempo em que elas cumprem mais um papel social, contribuindo com a comunidade para se resolver um problema que é a geração de rejeitos e que vem se tornando cada vez mais grave no que se refere impacto ao meio ambiente .
- (5) No aprofundamento do caso específico da injeção de resíduos de plásticos , entre vários conceitos que foram delineados , podemos citar que o método de preparação , tem uma influência sobre o comportamento da gaseificação e da combustão na zona de combustão. A eficiência da gaseificação e da combustão dos plásticos aglomerados, foi menor do que a dos plásticos moídos de mesma faixa granulométrica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, L. A.; Manual de Siderurgia. São Paulo: Discubra, 1967. 171 p.

Asanuma, M., et alli / Development of waste plastics injection process in blast furnace ISIJ International, v.40, n.3, p.244-251 , March 2000.

Biswas, A. K., Principles of Blast Furnace Ironmaking, Cootha Publishing House, Brisbane, Austrália, 1981

Campos, V. F. et alli, Tecnologia de Fabricação de Ferro Gusa em Alto Forno, UFMG, Belo Horizonte, Setembro, 1984

Chu, M., et alli, J-I. / Numerical analysis on injection of hydrogen bearing materials into blast furnace ISIJ International, v.44, n.5, p.801-808, 2004

Omori, Y. et alli, Blast Furnace Phenomena and Modeling, London Elsevier Applied Science Publ. Ltd., 1987.

Figueira, R. M et alli, Controle do Teor de Silício do Gusa, Fundação Chistiano Ottoni, Belo Horizonte, Junho 1989.

Gudenau, H. W. et alli, On the Coesive Zone Phenomena in the Blast Furnace, Scan. J. Metallurgy, 11

Haga, T., The Latest of Ironmaking Technology in Japan Relining of Oita nº 2 BF (the largest BF in the world), 2nd International Meeting on Ironmaking, 12 a 15 de setembro ,2004

Hotta, H. Recycling Technologies for Promoting Recycling-oriented Society. NKK Technical / Review, 88, 2003, p. 160-166.

Hundertmark, A., Perspectivas sobre as Tecnologias do Futuro, Metalurgia e Materiais, ABM, Dezembro, 1996, p704

Jans, J. & Weiss, W. Injection of Waste Plastics into the Blast Furnace of Stahlwerke Bremen. La Revue de Metallurgie - CIT, Octobre 1996, p. 1219-1226.

Mourão , Marcelo Breda (coord.) , Introdução à Siderurgia/ São Paulo . Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais , 2007 , p.55-100

Ogaki, Y., et alli / / Recycling of waste plastic packaging in a blast furnace system NKK Technical Review, n.84, p.1-7, July 2001.

Ozturk, B. & Fruehan, R. J. Silicon Transfer in Blast Furnace, Fifth International Iron and Steel Congress, Process Technology Proceedings, Vol. 6,Book 3, Washington, DC, 1986.

SHIGANG, L., et alli / Effect of granulating method of waste plastics injected into blast furnace on environmnet issues and the use of resources In: AIST. IRON AND STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE - AISTech, 2004, Nashville. Proceedings. Warrendale: Association for Iron and Steel Technology , 2004. v.1. p.385--392.

Tamura, K et alli, Optimisation of high-rate coal injection operation of blast furnace from viewpoint of formation of raceway and disintegration of coke, McMaster Iron and Steelmaking Symposium, Hamilton, Ontario, 1991

Turkdogan, E. T. et alli, Iron Steelmaking,6,(1980),268

Wakimoto, K., et alli / Recycling of waste plastics in a blast furnace system NKK Technical Review, n.78, p.59-65, July 1998.

Wakita, S. et alli / Recycling of Waste Plastics in NKK. SEASI Quarterly, December 2002, p. 60-67.