

**FRANCIENE TEIXEIRA DE SOUZA**

**MINI ALTO-FORNO *FLEX FUEL* OPERANDO COM CARGA  
AUTO-REDUTORA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito complementar para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. PhD. JOSÉ ADILSON DE CASTRO

**Volta Redonda**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FRANCIENE TEIXEIRA DE SOUZA

MINI ALTO-FORNO *FLEX FUEL* OPERANDO COM CARGA  
AUTO-REDUTORA

Aprovada em 19 de Maio de 2008.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. PhD. JOSÉ ADILSON DE CASTRO - Orientador  
EEIMVR / UFF- Universidade Federal Fluminense

---

Dr. JOSÉ HENRIQUE NOLDIN JÚNIOR  
Tecno-Logos - Desenvolvimento Tecnológico S.A.  
Diretor Regional da ABM / RJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARISA NASCIMENTO  
EEIMVR / UFF - Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO XAVIER  
UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda

Volta Redonda  
2008

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação a minha família por todos os momentos difíceis em que estiveram ao meu lado, pela compreensão e carinho. Especialmente ao meu orientador, pela dedicação. Aos meus amigos que sempre confiaram na minha vitória.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela saúde e perseverança, as quais foram essenciais para a elaboração deste trabalho,

Aos amigos de pós-graduação, pelas diversas colaborações e pelo agradável convívio ao longo do trabalho,

Ao professor José Adilson de Castro pela orientação e dedicação no decorrer do trabalho,

Aos Professores da EEIMVR / UFF, pelos conhecimentos transmitidos,

À minha família, pelo fiel apoio sempre dedicado, e por muito mais.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Processo Alto-forno	20
2.2	Alto-forno a Coque X Carvão Vegetal	29
2.2.1	Características do Coque e do Carvão Vegetal	30
2.3	Utilização de Combustível Auxiliar no Alto-forno	34
2.3.1	Injeção de Carvão Pulverizado (PCI – Pulverized Coal Injection)	34
2.3.2	Influência da Injeção de carvão Pulverizado no Alto-forno	35
2.3.2.1	Permeabilidade da Carga	35
2.3.2.2	Volume de Gás na Zona de Combustão	36
2.3.2.3	Temperatura de Chama	36
2.3.2.4	Perfil Térmico	36
2.3.3	Taxa de Substituição	37
2.4	Resíduos Sólidos	38
2.4.1	Geração de Resíduos Soldos nas Indústrias Siderúrgicas	39
2.4.2	Reciclagem dos Resíduos Sólidos Gerados pelas Indústrias Siderúrgicas	40
2.5	Modelamento Matemático do Alto-forno	43
2.5.1	Evolução dos Modelos Matemáticos	43

2.6	Linguagem de Programação - FORTRAN	46
3	METODOLOGIA	47
3.1	Modelo Matemático	47
3.1.1	Equação de Conservação	48
3.1.2	Termo Fonte	50
3.1.2.1	Termo Fonte de <i>Momentum</i>	52
3.1.2.2	Termo Fonte de Energia	54
3.1.2.3	Termo Fonte de Massa	57
3.1.3	Implementação do Mecanismo de Reações dos Álcalis e Zinco	60
3.1.4	Método de Solução Numérica	62
3.2	Processo Estudo	66
3.2.1	Características do Alto-forno	66
3.2.2	Características da matéria-prima	66
3.3	Casos Estudados	68
4	RESULTADOS	69
4.1	Comparação do mini alto-forno a coque e carvão vegetal	76
4.2	Utilização de carga auto-redutora no mini alto-forno a coque	82
4.3	Utilização de carga auto-redutora no mini alto-forno a carvão vegetal	86
4.4	Comportamento dos Álcalis e Zinco no Mini Alto-forno com Aglomerado Auto-redutor	90
4.4.1	Comportamento do Zinco no Mini Alto-forno carregado com 30% de Aglomerado Auto-redutor	95

5	CONCLUSÕES	96
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

#### APÊNDICES

A Trabalho apresentado no 60º Congresso Anual da ABM - Internacional, Belo Horizonte MG - Análise Computacional do Carregamento de Briquetes de Resíduos em Mini Altos-Fornos.

B Trabalho apresentado no XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas – Florianópolis , SC - Operação do Alto-Forno a Oxigênio com Altas Taxas de Injeção de Carvão e Recirculação de Gás de Topo em Dois Níveis de Ventaneiras



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Perfil interno do alto-forno	23
Figura 2.2	Zona granular	24
Figura 2.3	Zona de amolecimento e fusão	25
Figura 2.4	Zona de combustão	29
Figura 2.5	Injeção de carvão com dupla lança	37
Figura 3.1	Diagrama de interação entre as fases	48
Figura 3.2	Volume de Controle	62
Figura 3.3	Transferência de coordenadas usadas para tratar a irregularidade geométrica	63
Figura 3.4	<i>Flow chart</i> do modelo matemático	65
Figura 4.1	Parâmetros globais - Produtividade	71
Figura 4.2	Parâmetros globais – Percentual de silício no gusa	72
Figura 4.3	Parâmetros globais – Consumo de redutor granulado	73
Figura 4.4	Parâmetros globais – Consumo de sínter	74

Figura 4.5	Parâmetros globais – Volume de escória	74
Figura 4.6	Parâmetros globais – Basicidade da escória	75
Figura 4.7	Diâmetro do sólido e distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a coque e a carvão vegetal	76
Figura 4.8	Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal	78
Figura 4.9	Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal	80
Figura 4.10	Fração de redução da carga no mini alto-forno a coque e a carvão vegetal	81
Figura 4.11	Distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora	82
Figura 4.12	Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora	83
Figura 4.13	Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora	84
Figura 4.14	Fração de redução da carga no mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora	85
Figura 4.15	Distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	86
Figura 4.16	Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	87
Figura 4.17	Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	88
Figura 4.18	Fração de redução da carga no mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	89

Figura 4.19	Fração de redução da carga no mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	90
Figura 4.20	Distribuição do potássio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	91
Figura 4.21	Distribuição do sódio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	92
Figura 4.22	Distribuição do potássio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora e injeção de carvão pulverizado	93
Figura 4.23	Distribuição do sódio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora e injeção de carvão pulverizado	94
Figura 4.24	Distribuição do zinco para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características do coque e carvão vegetal	33
Tabela 2.2	Produção de ferro gusa no Brasil	34
Tabela 2.3	Geração de resíduos sólidos nas indústrias siderúrgicas	39
Tabela 2.4	Análise química dos resíduos	40
Tabela 3.1	Fases e espécies químicas resolvidas no modelo	50
Tabela 3.2	Termos fonte de momentum para a equação geral de conservação segundo Castro(2000)	51
Tabela 3.3	Termos fonte de energia segundo Castro(2000)	51
Tabela 3.4	Principais reações químicas	58
Tabela 3.5	Taxas de reação do zinco, sódio e potássio	61
Tabela 3.6	Dados dimensionais/operacionais do mini alto-forno	66
Tabela 3.7	Características do redutor granulado	67
Tabela 3.8	Composição química da carga metálica	67
Tabela 3.9	Formação dos casos estudados	68
Tabela 4.1	Principais parâmetros operacionais para o mini alto-forno	70

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$A_i$ :	Área superficial dos sólidos	$[m^{-1}]$
$A_{i-j}$ :	Área de contato entre as fases $i$ e $j$	$[m^{-1}]$
$a_j$ :	Coefficientes para as equações de $C_p$	$[J/kg.K]$
$b_j$ :	Coefficientes para as equações de $C_p$	$[J/kg.K^2]$
$C_{d_{i-j}}$ :	Coefficientes de arraste entre as fases $i$ e $j$	$[-]$
$C_{p,j}$ :	Capacidade térmica da substância $j$	$[J/kg.K]$
$c_j$ :	Coefficientes para as equações de $C_p$	
$D^*$ :	Diâmetro hidráulico	$[m]$
$D_{i,j}^T$ :	Difusividade binária para a espécie $i$ e $j$	$[m/s^2]$
$d_i$ :	Diâmetro da partícula para a fase $i$	$[m]$
$\dot{E}_{i-j}$ :	Transferência de calor convectivo entre as fases $i$ e $j$	$[W/m^3]$
$e_i$ :	Emissividade da fase $i$	$[-]$
$\vec{F}_i^j$ :	Transferência de movimento entre as fases $i$ e $j$	$[N/m^3]$
$F_m$ :	Resistência do componente sólido $m$ ao fluxo do gás	$[kg/m^4]$
$f_m$ :	Fração volumétrica do componente $m$ na fase sólida	$[-]$
$Fr_{i-j}$ :	Número de Froude para as fases $i$ e $j$	$[-]$
$\vec{g}$ :	Vetor gravitacional	$[m/s^2]$
$H_i$ :	Entalpia da fase $i$	$[J/kg]$
$\Delta H_{i,j}^T$ :	Calor de formação da espécie $j$ na fase $i$ à temperatura $T$	$[J/kg]$

$h_{i-j}$ :	Coeficiente de transferência de calor entre as fases $i$ e $j$	[W/m <sup>2</sup> .K]
$k_{\text{Boltzman}}$ :	Constante de Boltzman	[J/K]
$k_i$ :	Condutividade térmica da fase $i$	[W/m.K]
$M_j$ :	Peso molecular da espécie $j$	[kg/kmol]
$P_i$ :	Pressão da fase $i$	[Pa]
$Pe_{i-j}$ :	Número de Peclet para as fases $i$ e $j$	[-]
$Pr_{i-j}$ :	Número de Prandtl para as fases $i$ e $j$	[-]
$R$ :	Constante dos gases	[J/kmol.K]
$R_n$ :	Taxa da reação $n$	[kmol/m <sup>3</sup> s]
$Re_{i-j}$ :	Número de Reynolds para as fases $i$ e $j$	[-]
$Sc_i$ :	Número de Schmidt para a fase $i$	[-]
$S_\phi$ :	Termo fonte da Eq. (6.1)	
$T_i$ :	Temperatura da fase $i$	[K]
$\vec{U}_i$ :	Vetor velocidade da fase $i$	[m/s]
$Wi_{i-j}$ :	Número de Weber para as fases $i$ e $j$	[-]
$w$ :	Parâmetro estequiométrico da wustita	[-]
$y_{i,j}$ :	Fração molar da espécie $j$ na fase $i$	[-]

#### Símbolos gregos

$\Gamma_\phi$ :	Coeficiente de transferência na Eq. (6.1)	
$\varepsilon_i$ :	Fração volumétrica da fase $i$	[-]
$\varepsilon_j$ :	Energia molecular característica de interação para a espécie $j$	[J]
$\zeta_m$ :	Fator de tortuosidade de poros para o componente $m$	[-]
$\theta$ :	Ângulo de inclinação da camada de sólido	[radianos]
$\theta_{i-j}$ :	Ângulo de contato entre as fases $i$ e $j$	[radianos]
$\rho_i$ :	Densidade da fase $i$	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi_i$ :	Variável dependente na Eq. (6.1)	
$\varphi_i$ :	Fator de forma para a fase $i$	[-]

## RESUMO

Visto que a tecnologia *flex fuel* tem sido um grande sucesso no setor automobilístico, este trabalho propõe sua aplicação na operação de altos-fornos, para permitir a escolha da melhor alternativa para o processo. A verificação da viabilidade de operação de um mini alto-forno, ora com coque ora com carvão vegetal, é analisada através do modelo matemático 3D proposto por Castro<sup>(1)</sup>. Este modelo simula o funcionamento do alto-forno, considerando as diferentes fases no interior do forno, interagindo simultaneamente, transferindo quantidade de movimento, energia e massa. Este fenômeno é representado por equações de transporte, que são resolvidas com base no método de volumes finitos. A solução computacional é feita através de código desenvolvido em linguagem de programação Fortran. Faz-se uma comparação entre os resultados do campo de temperatura, perfil da zona coesiva, fração de redução e distribuição da concentração dos componentes da carga, obtidos para o carregamento com o coque e com o carvão vegetal. São analisados casos utilizando PCI combinado ou não, com carregamento de aglomerados auto-redutores, tanto no mini alto-forno a coque quanto no mini alto-forno a carvão vegetal. Com a introdução dos mecanismos de reações do sódio, potássio e zinco ao modelo original, é possível estudar a influência do carregamento de aglomerados auto-redutores, fabricados a partir de resíduos siderúrgicos. Os resultados da simulação mostram ser possível a flexibilidade no uso do combustível, mantendo os parâmetros de operação e qualidade do gusa numa faixa aceitável.

Palavras-chave: *flex fuel*; mini alto-forno; simulação; PCI; aglomerado auto-redutor.

## ABSTRACT

Once the fuel flex technology is a success in automotive sector, this work proposes its application in Blast Furnace operation, allowing the choice of the best alternative for the process. The verification of operation feasibility of a mini Blast-Furnace, first with coke then with charcoal, is analyzed through 3D mathematic model proposed by Castro<sup>(1)</sup>. Such model simulates the functioning of a Blast Furnace, considering the different phases inside the furnace, interacting simultaneously, transferring momentum, energy and mass. This phenomenon is represented by transport equations, which are resolved based on finite volumes. The computer solution is performed through code, developed in Fortran language. A comparison amongst results of temperature distribution, cohesive zone location, reduction fraction, and distribution of burden component concentration, obtained for loading with coke and with charcoal. It is analyzed cases utilizing combined PCI or not, with loading of self-reducing agglomerates, so in coke-fueled mini blast furnace as in charcoal-fueled mini blast furnace. By introducing sodium, potassium and zinc reaction mechanisms to the original model, it is possible to evaluate the influence of loading of self-reducing agglomerates, fabricated with steelmaking residues. The results of the simulation indicate that the flexibility in the use of combustible is possible, maintaining the parameters of operation and quality of the pig iron in an acceptable range.

Keywords: flex fuel; mini Blast-Furnace; simulation; PCI; self-reducing agglomerates.



## 1 INTRODUÇÃO

Grande parte da produção de aço é proveniente do gusa produzido através da redução de minérios via altos-fornos, seja em indústrias integradas ou produtores independentes. Nos últimos anos grandes esforços têm sido empregados em estudos e projetos que permitam racionalizar o consumo de matérias-primas e insumos, otimizar a eficiência energética, maximizar o aproveitamento de co-produtos dos processos envolvidos na produção do aço e ainda reduzir o impacto ambiental causado pelo processo.

O alto-forno é um reator químico de contra corrente, no qual o propósito principal é reduzir óxidos de ferro para ferro líquido. O principal redutor é o carbono, apesar do hidrogênio também dar uma pequena contribuição. A fonte de carbono para o processo é o carvão, que pode ser de origem mineral (coque) ou vegetal.

É nítida a preferência das usinas integradas pelo uso de coque, enquanto que as produtoras independentes são responsáveis pelo elevado consumo de carvão vegetal na produção do ferro-gusa no Brasil.

Da mesma forma que o álcool combustível, o carvão vegetal concorre com um combustível-redutor fóssil, de custo inferior. Assim, o carvão vegetal deve ser considerado por suas vantagens ecológicas, já que é uma fonte renovável, quando oriundo do plantio florestal, que ocupa terras de valor marginal, por serem pouco adequadas à produção agrícola. O problema é que, por estratégia de barateamento dos custos do principal insumo, os produtores independentes buscam adquirir carvão vegetal oriundo de mata primária, prática que os órgãos ambientais têm exercido fortes pressões para combater.

Por outro lado, as indústrias que utilizam coque, enfrentam problemas de oscilações no preço e escassez do insumo, por conta da importação, pois o carvão coqueificável do Brasil é de má qualidade e insuficiente para suprir a demanda do país. Além disso, o processo de coqueificação tem forte impacto ambiental.

A injeção de carvão pulverizado (PCI) é uma importante técnica complementar no processo, a qual além de assegurar a estabilidade de operação do forno, torna possível expandir as opções de carvões que podem ser utilizados no processo reduzindo custos devido ao uso de materiais mais baratos e até mesmo finos gerados na estocagem e transporte do combustível granulado carregado no topo.

O carregamento de aglomerado auto-redutor em substituição a parte do sinter, além de reduzir o consumo de combustível, possibilita reciclar resíduos gerados no próprio processo, que têm um teor de ferro considerável e pouca ou nenhuma alternativa de aproveitamento.

No mini alto-forno o tempo de residência da carga é menor, possibilitando o carregamento de materiais de fácil degradação.

O modelo de Castro<sup>(1)</sup> adotado neste estudo é capaz de prever com boa aproximação o comportamento do reator em função da qualidade das matérias-primas. Neste trabalho é acrescentado ao modelo original, a cinética de reação dos álcalis (sódio e potássio) e do zinco, o que possibilita prever a interferência no processo causada pelo carregamento de aglomerados de resíduos que contém estes elementos.

Este trabalho é estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 coloca-se o objetivo do trabalho; no capítulo 3 é mostrado, na revisão bibliográfica, o processo alto-forno, com as particularidades das regiões que compõem seu perfil interno, a seguir apresenta-se alto-forno a carvão mineral e carvão vegetal, assim como a prática de injeção de carvão pulverizado e utilização de carga auto-redutora, fabricada a partir de resíduos gerados na siderurgia, ainda neste capítulo descreve-se a evolução dos modelos matemáticos para altos-fornos. No capítulo 3 faz-se uma explanação do modelo adotado, das características da matéria-prima e dos parâmetros operacionais aplicados ao processo estudado. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, fazendo uma comparação entre os modos de operação a coque e a carvão vegetal, analisando a operação com carga auto-redutora no mini alto-forno a coque e no mini alto-forno a carvão vegetal, este

capítulo termina com a análise do comportamento dos álcalis no mini alto-forno com aglomerado auto-redutor. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

## **1.1 OBJETIVO**

Este trabalho tem por objetivo estudar a operação de um mini alto-forno usando coque ou carvão vegetal como combustível, através de simulação computacional, utilizando o programa desenvolvido por Castro<sup>(1)</sup>. Além da flexibilidade do processo, em relação ao combustível carregado, foi realizado estudo da substituição de parte do sínter por aglomerados auto-redutores, combinada ou não com a injeção de carvão pulverizado. O estudo visa provar que é operacionalmente viável ter um processo flexível, que possibilite contornar as crises que ocorrem no mercado de matéria-prima do setor.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 PROCESSO ALTO-FORNO**

O alto-forno é um equipamento destinado a produzir ferro-gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1.400°C. O alto-forno utiliza como matérias-primas básicas a carga metálica (sínter, pelotas, minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado, etc).

O sínter é produzido na sinterização e tem como constituinte principal o minério de ferro. O coque é produzido na coqueria e é obtido através da pirólise do carvão mineral. Outros materiais podem ser utilizados, também, carregados pelo topo ou injetados na região inferior do forno, onde o ar quente é soprado, gerando gases que ascendem em contracorrente com os sólidos carregados pelo topo.

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.

O alto-forno é carregado com matérias-primas ferrosas preparadas (sínter e pelotas) ou naturais (minério de ferro granulado); com um combustível e fonte de gás redutor (coque ou carvão vegetal); e, também, pode ter injeções auxiliares pelas ventaneiras. O objetivo é produzir uma liga, no estado líquido, composta de ferro e carbono e mais alguns elementos de liga (silício, manganês, etc), também existe uma produção significativa de escória e gás de alto-forno.

No topo do forno as matérias-primas ferríferas são carregadas de modo a formar, no interior do forno, camadas separadas das de combustível sólido.<sup>(2)</sup>

Através das ventaneiras é feita a injeção do ar soprado e de combustíveis auxiliares. O número de ventaneiras aumenta com o tamanho dos fornos, podendo alcançar mais de 40 nos grandes altos-fornos. O ar quente é introduzido pelas ventaneiras para a combustão do combustível granulado.

A capacidade produtiva de um alto-forno está diretamente ligada ao volume interno do equipamento. O volume interno dos altos-fornos varia bastante dependendo da capacidade projetada para cada usina siderúrgica. Não existe uma classificação padronizada, porém considera-se, de uma maneira geral, que alto-forno com volume interno menor que  $1.500\text{m}^3$  é de pequeno porte, alto-forno com volume entre  $1.500\text{m}^3$  e  $3.000\text{m}^3$  é de médio porte e com volume acima de  $3.000\text{m}^3$ , é de grande porte.<sup>(2)</sup>

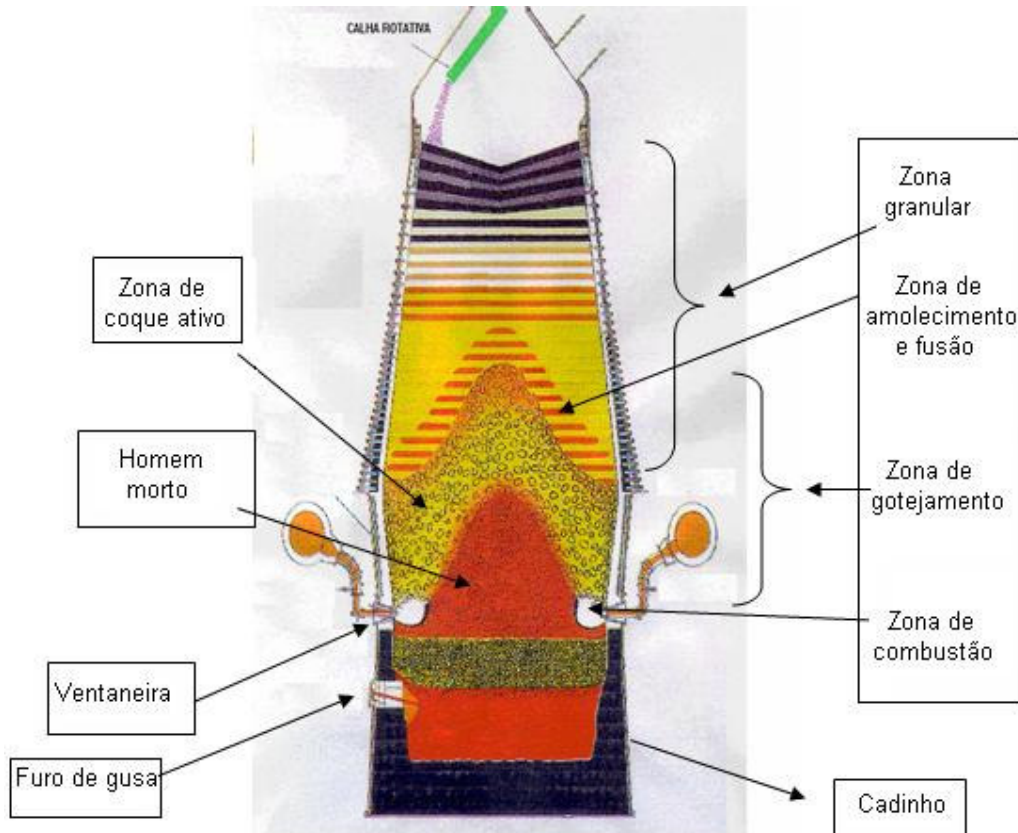
O minério de ferro carregado no alto-forno traz consigo impurezas, sendo as principais a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que, fundidos formarão a escória, um produto composto de silicato complexos, que será separada da fase metálica (gusa) durante a operação de vazamento do forno.

O coque no caso de médios e grandes altos-fornos brasileiros, é o combustível base utilizado no processo, enquanto que para os de pequeno porte, mini altos-fornos, normalmente utiliza-se carvão vegetal. O combustível sólido reage com o ar injetado, queimando na zona de combustão e gerando a principal parcela de calor necessária para o processo. Além disso, em decorrência de sua combustão na região das ventaneiras, produz um gás, composto principalmente de nitrogênio e monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), em altas temperaturas, que funcionará como o principal redutor dos óxidos de ferro.

Os fundentes, também chamados agentes escorificantes, são matérias-primas utilizadas para conferir às escórias uma proporção adequada de seus quatro óxidos principais ( $\text{CaO}$ -  $\text{SiO}_2$  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  - $\text{MgO}$ ) e, por isso, variam em quantidade e tipo, em função da composição química do restante da carga. Da proporção dos quatro óxidos depende a fluidez da escória, suas propriedades dessulfurantes e de eliminação de outras impurezas.

O gás gerado transfere calor ao atravessar a carga que desce do topo em sentido contrário, esta por sua vez é consumida por reações de combustão, redução direta, redução indireta, transferência de silício e transformações físicas, como fusão, produzindo o ferro gusa e a escória que gotejam até o cadinho.

A figura 2.1 a seguir mostra as regiões internas que compõe o perfil interno de um alto forno. Elas são responsáveis pelos diversos fenômenos e reações que ocorrem no interior do equipamento e que estabelecem o desempenho operacional.



**Figura 2.1** - Perfil interno do alto-forno.

Elas são definidas por:

### **Zona Granular**

Nesta região, o minério e o coque mantêm a sua configuração em camadas, tais como foram carregados, ou seja, camadas alternadas de coque/carvão vegetal e minério. Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos), portanto a redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido.<sup>(2)</sup>

Esta região está compreendida entre o nível superior da carga e o início de amolecimento da carga metálica, varia entre a temperatura do topo ( $\pm 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e a temperatura onde os constituintes da carga metálica iniciam o seu amolecimento (em torno de  $1100^{\circ}\text{C}$ ).

A figura 2.2 esquematiza o posicionamento desta região dentro do forno.



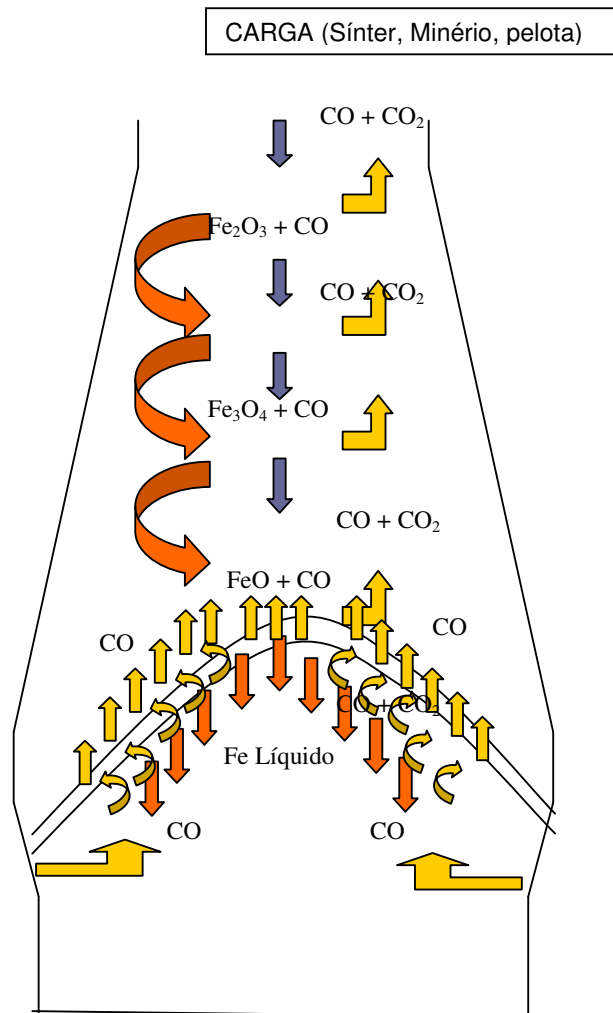


Figura 2.2 – Zona Granular

### Zona de Amolecimento e Fusão

Localizada logo abaixo da zona granular. É definida pela temperatura de início de amolecimento e final de fusão dos componentes da carga metálica.

Esta região determina ao sistema uma elevada resistência à passagem dos gases, pois os materiais metálicos numa fase de transição física (amolecimento e fusão) apresentam uma característica pastosa, camadas desta fase alternadas a camadas de coque/carvão vegetal causam uma elevada perda de pressão na coluna do forno. A figura 2.3 esquematiza o posicionamento desta região dentro do forno.

Os materiais que compõe a carga possuem pontos de amolecimento e fusão diferentes. Logo a zona de amolecimento e fusão é definida pela composição entre as faixas de cada constituinte da carga metálica que se somam de modo a formar a zona de amolecimento e fusão global.

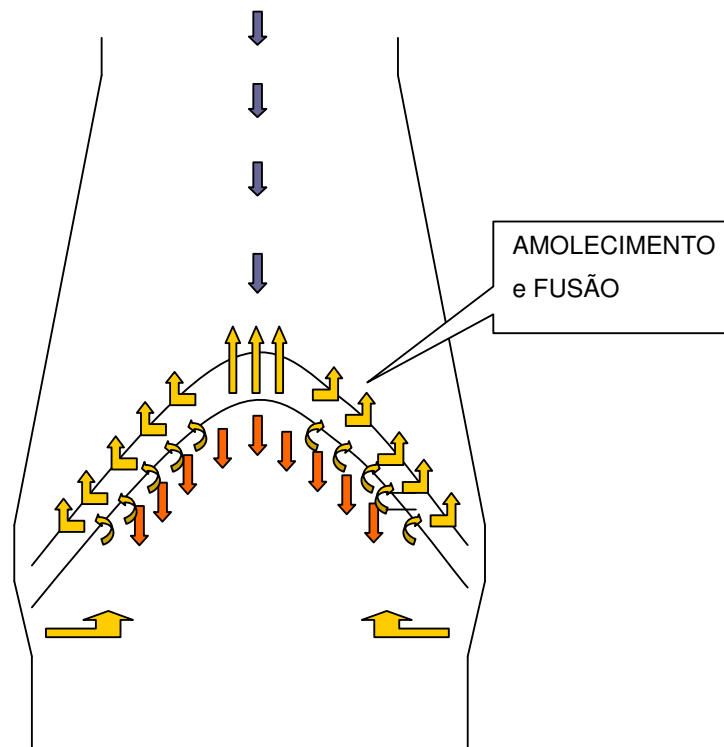


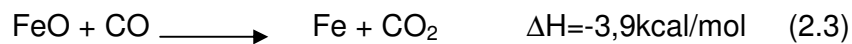
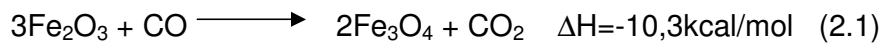
Figura 2.3 - Zona de amolecimento e fusão

### Zona de Elaboração

Nesta zona os gases provenientes da combustão do coque/carvão vegetal 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  $\text{FeO}$  a  $\text{Fe}$ , e gaseificação do combustível pela reação de Bourdouard.

Na estreita faixa da zona granular que pertence à zona de elaboração, sucedem grande parte das reações de redução da carga ferrífera e da gaseificação do coque/carvão vegetal, sendo portanto uma região de alta endotermicidade, com elevado gradiente de temperatura.<sup>(2)</sup>

A redução da hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a Fé é realizada em estágios, conforme as seguintes equações:



A redução da wustita (2.3) necessita de um elevado potencial de gás redutor. Este gás, após a redução da wustita, ascende no forno e reduz facilmente a magnetita (2.2) e a hematita (2.1) devido ao baixo potencial redutor necessário a estas reações. Assim, a redução da wustita (2.3) é de capital importância no forno.<sup>(2)</sup>

As equações (2.1), (2.2) e (2.3) são chamadas reações de redução indireta e o produto é o  $\text{CO}_2$ . Globalmente, a redução indireta é levemente exotérmica. Como o  $\text{CO}_2$  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.

Na zona de combustão o  $\text{CO}_2$  produzido pela redução indireta é rapidamente reduzido pelo carbono de acordo com a equação (2.4), conhecida como reação de Bourdourd ou *solution loss*.



A equação (2.5) é a chamada reação de redução direta e é altamente endotérmica em contraste com a redução indireta e, além disso, consome e degrada o coque/carvão vegetal. 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 , 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 de 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. <sup>(2)</sup>

### **Zona de Gotejamento**

Esta região contém coque/carvão vegetal na forma sólida, em cujos intertícios gotejam o gusa e a escória. Esta zona é dividida em duas subzonas: a região de coque/carvão vegetal 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. <sup>(2)</sup>

### **Coque/Carvão Vegetal Ativo**

Esta região compreende a porção que rola em direção às ventaneiras para ser queimado. <sup>(2)</sup>

É caracterizada pela movimentação lenta do sólido com um tempo de residência de dias. Nesta região, os intertícios na camada de combustível sólido e o diâmetro da partícula é menor que a média no forno, devido às reações de dissolução do carbono , redução direta e transferência de silício. <sup>(1)</sup>

### **“Homem Morto”**

Nesta região o coque/carvão vegetal não rola em direção às ventaneiras e é condumido basicamente pela incorporação de carbono ao gusa. <sup>(2)</sup>

Está localizada imediatamente abaixo da zona de coque/carvão vegetal ativo e constitui-se de coque/carvão vegetal misturado com gusa e escória de baixa fluidez que formam um aglomerado de elevada densidade e baixa fluidez. Não permite que os líquidos passem através dela e impede a reação do coque/carvão vegetal pelo CO<sub>2</sub>.

## Zona de Combustão

O ar aquecido pelos regeneradores é injetado nas ventaneiras a uma velocidade alta, o coque/carvão vegetal em frente das ventaneiras é empurrado formando uma cavidade, onde o coque/carvão vegetal circula em movimentos rápidos, ao mesmo tempo em que é queimado pelo oxigênio do ar e vai diminuindo de tamanho à medida que reage. A zona de combustão é também chamada de race way.

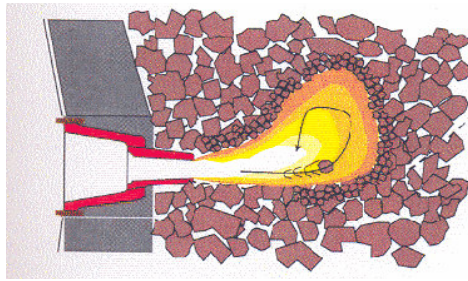
As principais reações do coque/carvão vegetal na frente das ventaneiras, onde ele é queimado pelo ar injetado, ocorrem como indicado a seguir:



Inicialmente ocorre a oxidação do carbono do coque/carvão vegetal pelo oxigênio do ar, conforme a reação (2.6), gerando grande quantidade de calor. Como o CO<sub>2</sub> é instável na presença de carbono acima de 1000 °C, e existe temperatura e carbono em excesso, a reação de Bourdouard (2.2) se desenvolve rapidamente. Dessa forma, para efeito termodinâmico tudo se passa como se somente ocorresse a reação (2.7), ou seja, que todo oxigênio do ar injetado no alto-forno queima o carbono do coque/carvão vegetal produzindo CO. O ar soprado contém ainda umidade cuja decomposição se dará segundo a reação: <sup>(2)</sup>



A figura 2.4 mostra a configuração desta zona no interior do cadinho bem como a distribuição dos gases formados. Nela também é possível visualizar a combustão do coque/carvão vegetal e seu efeito de rolagem e degradação que ocorrem por ação do ar soprado.



**Figura 2.4 - Zona de combustão**

### **Cadinho**

Região cilíndrica que compõe a parte inferior do 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 para a drenagem periódica do gusa e escória. Na parte superior do cadinho, ficam posicionadas as ventaneiras.<sup>(2)</sup>

O cadinho é preenchido com coque/carvão vegetal granulado, por cujos interstícios se depositam o gusa e a escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade. No cadinho ainda ocorrem importantes reações entre as fases metálicas e escorificada, tal como a dessulfuração do gusa.

## **2.2 ALTO-FORNO A COQUE X ALTO-FORNO A CARVÃO VEGETAL**

No processo de produção do ferro, o carvão, seja ele mineral ou vegetal, tem importante papel, na medida em que fornece calor para a combustão, fornece carbono para a redução de óxido de ferro, indiretamente e fornece carbono como principal elemento de liga do ferro gusa.

## 2.2.1 Características do Coque e do carvão Vegetal

### Coque

O coque é originado da destilação do carvão mineral extraído de reservas fósseis. No Brasil, cuja produção se concentra na região Sul, as reservas desse mineral são de baixa qualidade. Essa escassez implica a necessidade contínua de importação e estabelece uma dependência externa para manter a siderurgia nacional.

A matéria prima para a fabricação de coque para processos de redução é o carvão mineral metalúrgico ou coqueificante.

O carvão mineral é uma massa compacta, estratificada, oriunda da deterioração de matérias vegetais as quais passam por vários estágios de decomposição conseqüente de ações geológicas que provocam modificações em suas propriedades físicas e químicas. <sup>(3)</sup>

Quimicamente ocorrem alterações complexas na estrutura vegetal com desprendimento de umidade, óxidos de carbono e metano, enquanto fisicamente tem-se mudanças de cor (escurecimento) e dureza e o aparecimento de resistência semelhante à de materiais.

Por causa de suas características físicas e da natureza de seus depósitos, o carvão é classificado como uma rocha, embora tenha origem vegetal. Devido ao maior ou menor tempo a que ficou exposta à decomposição, a matéria vegetal dá origem a carvões com diferentes propriedades. A designação de um carvão como coqueificável ou não coqueificável, depende de sua ação quando aquecido em ausência de ar. Se o carvão amolece e eventualmente se solidifica e forma uma massa mais ou menos sólida, ele é classificado como carvão coqueificável, se ele desagrega com o aquecimento ou forma uma massa fracamente consistente, é classificado como não coqueificável. <sup>(3)</sup>

No Brasil, apenas o carvão metalúrgico de Santa Catarina é classificado como coqueificável, mas mesmo assim, possui elevado teor de cinzas (18,5 %) e de enxofre (1,5 %).

O coque metalúrgico é o produto de destilação de carvão mineral à temperatura de, aproximadamente, 1000°C. A coqueificação é feita numa bateria contendo retortas (longas, altas e estreitas) e com aquecimento entre elas. Após o

descarregamento, o coque é resfriado bruscamente (extinção) com água ou nitrogênio.

Para operações de redução de minérios de ferro (alto-forno) o coque deve ter alta resistência para evitar a degradação dentro do forno, assim como conter alto teor de carbono (carbono fixo), apresentar baixa reatividade e baixo teor de enxofre (<1%).<sup>(3)</sup>

### **Carvão Vegetal**

O carvão vegetal deriva da carbonização da madeira extraída de florestas nativas ou plantadas. Por se originar de florestas, constitui uma fonte renovável e praticamente inesgotável de recursos.

No Brasil, sobretudo no Estado de Minas Gerais, é muito grande o volume de madeira anualmente transformada em carvão vegetal. Segundo o relatório anual da ABRACAVE (2000), 20,5 x 10<sup>6</sup> mdc foram produzidos para atender as siderúrgicas em sua demanda de carvão. Diante da enorme quantidade de madeira carbonizada anualmente, e da conseqüente pressão sobre as áreas de florestas nativas ainda exploradas pelos carvoeiros, é recomendável a aplicação de técnicas visando o aumento da produtividade. Nesse sentido, novas técnicas de manejo e de exploração florestal, aliadas ao melhoramento genético, têm propiciado aumentos significativos na produção volumétrica da madeira por unidade de área plantada, sobretudo de eucalipto.<sup>(3)</sup>

A madeira para a produção do carvão provém da plantação de várias espécies de eucalipto (*E. Camaldulensis*, *Cloesiana*, *Urophylla* e *Pellita*). Quando proveniente de floresta artificial, em um ciclo, relativamente pequeno, cerca de 7 anos, é possível capturar da atmosfera o CO<sub>2</sub> emitido nas fases de produção de gusa. Esta é uma tecnologia atrativa especialmente para países como Brasil, Austrália e China, onde o clima é favorável ao plantio de eucalipto.<sup>(4)</sup> Através do processo da fotossíntese, o carbono é retirado do dióxido de carbono e incorporado à biomassa, com o oxigênio sendo liberado de volta para atmosfera.

O carvão vegetal é um redutor mais puro e com um menor teor de cinza quando comparado com o carvão mineral, largamente utilizado pelo setor siderúrgico.

Outro fato importante em relação aos altos-fornos a carvão vegetal é que eles trabalham com limites inferiores de temperatura para a produção de ferro-gusa e,



sendo assim, são menos entrópicos que o processo a carvão mineral. A injeção de finos no alto-forno diminui a liberação de poeiras e demais partículas para o meio, uma vez que o manuseio dos finos representa uma das principais fontes de poluição de uma usina siderúrgica.

A siderurgia a carvão vegetal no Brasil incrementou-se a partir do século XIX. A abundância do minério de ferro e a floresta natural, nas proximidades das fábricas, permitiram o seu desenvolvimento. Enquanto na Europa, por volta de 1880, a siderurgia iniciava sua transformação, substituindo o carvão vegetal pelo carvão mineral, no Brasil esta transformação só se iniciou em 1940, com a construção de Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda.

Porém, a siderurgia a carvão vegetal continuou suas atividades em usinas de pequeno porte, distribuídas por todo Brasil, principalmente nas regiões onde havia grandes jazidas de minério de ferro ou florestas de onde poderiam extrair a madeira para a produção de carvão vegetal.

Na década de 90 houve, entretanto, progressiva diminuição do consumo de carvão vegetal, devido à crescente substituição do carvão vegetal pelo coque, por parte das usinas integradas.

As produtoras independentes de ferro-gusa são, então, as responsáveis pela manutenção do elevado consumo de carvão vegetal na produção do ferro-gusa no Brasil.

A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre os dois combustíveis, com foco na qualidade química, física e metalúrgica dos mesmos, uma vez que tais características é que vão traduzir sua capacidade de atender as solicitações a que são submetidos no alto-forno.

**Tabela 2.1** Características do Coque e Carvão Vegetal <sup>(4)</sup>

Qualidade	Item	Unidade	Valor	
			Coque	Carvão Vegetal
Química	Carbono Fixo	%	86~89	70~75
	Matérias voláteis	%	1~3	20~25
	Cinzas	%	10~12	2~3
	Enxofre	%	0,45~0,70	0,03~0,10
	SiO <sub>2</sub>	%	50~55	5~10
	CaO	%	4~5	37~56
	MgO	%	4~5	5~7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25~30	2~12
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5~7	6~13
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,40~0,80	8~12
	K <sub>2</sub> O	%	2~4	15~25
	Na <sub>2</sub> O	%	1~3	2~3
Física	Resistência à compressão	kg/cm <sup>2</sup>	130~160	10~80
	Faixa Granulométrica	mm	25~75	9~101,6
	Densidade	t/m <sup>3</sup>	0,550	0,250
Metalúrgica	Reatividade (a 950°C)	%	15	60
	Resistência após a reação	%	60	-
	Densidade	(%)	30	100

A tabela 2.2 mostra a produção de ferro gusa no Brasil para siderúrgicas a coque e siderúrgicas a carvão vegetal, entre os anos de 2000 e 2006.

**Tabela 2.2** Produção de Ferro Gusa no Brasil

Ano	Siderurgia a Coque	Siderurgia a Carvão Vegetal			Totais
		Usinas Integradas	Produtores Independentes	Total	
2000	20.323.476	1.253.782	6.145.377	7.399.159	27.722.635
2001	19.577.677	1.303.045	6.510.233	7.813.278	27.390.955
2002	21.595.610	1.294.184	6.759.890	8.054.074	29.649.684
2003	22.564.026	1.346.753	8.103.864	9.450.617	32.014.643
2004	23.225.888	1.449.705	10.085.072	11.534.777	34.760.665
2005	22.460.688	1.649.889	9.773.225	11.423.114	33.883.802
2006	21.275.851	1.709.072	9.466.619	11.175.691	32.451.542

Unidade: ton

Fonte: SINDIFER

## **2.3 UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL AUXILIAR NO ALTO-FORNO**

A injeção de materiais sólidos, líquidos e gasosos em altos-fornos não é uma técnica nova. Os motivos que levaram determinada empresa a optar pela injeção são determinados por fatores ligados a um aumento de produção, aproveitamento de fontes energéticas naturais de baixo custo, aproveitamento de resíduos, melhoria na qualidade do gusa. A lista de materiais já testados é grande e inclui: plásticos picotados, óleo combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados.

### **2.3.1 Injeção de Carvão Pulverizado (PCI – Pulverized Coal Injection)**

O carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras pode desempenhar duas das três funções básicas do coque ou carvão vegetal carregado no forno: prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor.

Segundo Filho et al<sup>(5)</sup> a primeira injeção de carvão em pó na tubulação de vento data, de 1840, quando Corbin d'Arboissieres, na França, conseguiu atingir uma economia de 10% de carvão no topo do forno.

Somente em 1916, Bassett iniciou na França a injeção de carvão como um fator de controle do alto-forno. Através da alteração das quantidades de injeção de diferentes materiais (colocados em dois silos), um de fácil e outro de difícil combustão, podia controlar o processo no alto-forno.

Em 1973, o custo do barril de petróleo quadruplicou, fazendo com que algumas usinas repensassem o modelo até então adotado. Foi preciso, no entanto, uma nova elevação nos preços do barril de petróleo, ocorrido em 1979, quando os preços triplicaram, para que houvesse uma corrida no desenvolvimento de tecnologias, no mundo inteiro, para substituição do óleo combustível por carvão mineral/carvão vegetal.

Uma das vantagens desse combustível é que o carvão usado não precisa ter características de qualidade como as exigidas para a produção de coque. Isto torna o carvão pulverizado um excelente substituto a outros mais caros, como óleo combustível e gás natural. O processo de injeção de carvão pulverizado deve atender aos requisitos básicos: garantir uma quantidade injetada, sua distribuição adequada nas ventaneiras, a não deposição de cinzas nos algaravizes (para evitar o bloqueio do ar soprado), funcionamento contínuo da unidade e inexistência de desgaste acentuado nas tubulações. A elevação da taxa de injeção leva normalmente a menores índices de combustão, tanto para o carvão mineral quanto para o carvão vegetal. Além da qualidade do carvão injetado, outra variável importante é sua distribuição por ventaneira. Ou seja, a instalação deve dispor, em princípio, de uma maneira de se regular a taxa de injeção de carvão por ventaneira.<sup>(5)</sup>

## **2.3.2 Influência da Injeção de Carvão Pulverizado no Alto-Forno**

### **2.3.2.1 Permeabilidade da Carga**

Com a injeção de carvão ocorre a elevação da relação minério para coque/carvão vegetal, já que o carvão injetado substitui o combustível carregado pelo topo, provocando a piora na permeabilidade da coluna de carga.

### **2.3.2.2 Volume de Gás na Zona de Combustão**

É a região onde o carbono do combustível carregado no topo e do combustível injetado pelas ventaneiras entra em combustão com o  $O_2$  do ar soprado e do enriquecimento, se houver. Conseqüentemente o volume de gás nesta região se eleva com o aumento da taxa de injeção de carvão, tendo como conseqüência uma piora na permeabilidade do forno. Devido a isto com a elevação da taxa de carvão é realizada a substituição de parte do ar soprado por  $O_2$  com a finalidade de manter constante o volume de gás gerado. Outro aspecto importante que pode ocorrer é que, com o aumento da taxa de combustão aumenta-se a geração de CO que sai da zona de combustão elevando significativamente o volume de gás no interior do forno, elevando a temperatura do gás do topo.

### **2.3.2.3 Temperatura de Chama**

O carvão injetado atua na temperatura de chama com efeito refrigerante, baixando a temperatura a medida que a taxa é elevada. Isto ocorre porque o C que entra pelo carvão a temperatura ambiente substitui o C do coque/carvão vegetal, que entra na zona de combustão aquecido. Outro fator que contribui para baixar a temperatura de chama é a decomposição da umidade e voláteis do carvão que consome energia. Usa-se enriquecer o ar soprado com  $O_2$  para manter a temperatura de chama.

#### **2.3.2.4 Perfil Térmico**

A injeção de carvão provoca a elevação dos gases gerados no interior do forno com aumento substancial da perda térmica através das paredes do forno. O aumento na relação minério para coque/carvão provoca a redução das janelas na zona coesiva elevando a velocidade dos gases em direção à parede do forno. Este aumento de velocidade provoca um maior desgaste da parede, além da maior perda térmica.

#### **2.3.3 Taxa de Substituição**

A taxa de substituição é definida pela relação entre a quantidade de coque/carvão vegetal economizada com a injeção do combustível auxiliar e a quantidade de combustível auxiliar utilizada. Ela varia com o tipo de combustível utilizado e também sofre influência das condições operacionais do Alto-Forno, como por exemplo, a temperatura de sopro alcançada e o percentual de enriquecimento utilizado. A combustão do carvão ocorre dentro da zona de combustão onde ainda existe  $O_2$  para reagir. Desta forma quanto menor os teores de voláteis no carvão maior será a quantidade de carbono no mesmo e maior será a taxa de substituição.

A economia através do sistema de PCI depende diretamente da taxa de substituição alcançada durante a injeção.

Existe um consenso entre os usuários de PCI que, até taxas de 100 Kg/t ou mesmo de 150 Kg/t para alguns, não há necessidade de alterações significativas nos procedimentos operacionais. Porém, para taxas mais elevadas, existe a necessidade de se experimentar com a distribuição de carga, com o enriquecimento do ar com oxigênio e com os critérios de qualidade das matérias-primas, antes de se obter uma operação estável.<sup>(3)</sup>

Com objetivo de otimizar a taxa de substituição algumas técnicas são utilizadas:

- i) Elevação da temperatura de chama (depende de boa permeabilidade);
- ii) Redução da matéria volátil do carvão pulverizado;
- iii) Alteração da lança de carvão;
- iv) Duplicação da lança de carvão (figura 2.7).

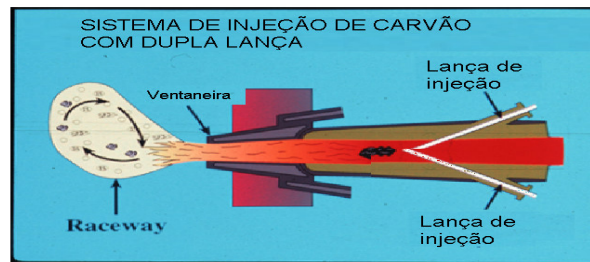


Figura 2.5 - Injeção de carvão com dupla lança

## 2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), através da norma NBR 10004 caracteriza como Resíduos Sólidos àqueles que se encontram nos estados sólido ou semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados.

A geração de resíduos no processo de fabricação do aço em uma usina integrada, é um fato relevante que tem trazido inúmeras preocupações aos envolvidos no setor. Tais preocupações são reproduzidas face às grandes quantidades geradas e as elevadas despesas com o seu manuseio, carência de disponibilidade de áreas adequadas, internas e externas à usina para estoque e/ou disposição final assim como pelo potencial poluidor agregado a estes.

Um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas do setor, hoje, é a busca por tecnologias que possam reaproveitar os diversos resíduos gerados em seus processos.

Duas causas motivam a procura de tecnologias que solucionem os problemas nos processos industriais relacionados com a geração de resíduos: a primeira causa está relacionada ao meio ambiente, onde as exigências impostas pela legislação

ambiental fazem com que a procura por tecnologias se torne mais intensa por parte das empresas. As pressões feitas pela comunidade em geral também obrigam as empresas a se enquadrarem a valores mais toleráveis os seus níveis de poluentes emitidos; a segunda causa visa minimizar custos e procura otimizar os resultados, ou seja, o reaproveitamento destes resíduos, após uma análise econômica, o que poderá reduzir custos no processo e gerar receitas.

### 2.4.1 Geração de Resíduos Sólidos nas Indústrias Siderúrgicas

As indústrias integradas de ferro e aço geram grandes quantidades e vários tipos de resíduos, nas diferentes etapas do processo. Nos vários tipos de resíduos se incluem as escórias, pós, lamas e carepa de laminador. A tabela 2.3 mostra a geração dos principais resíduos gerados nas indústrias siderúrgicas.

**Tabela 2.3** - Geração de Resíduos Sólidos nas Indústrias Siderúrgicas <sup>(6)</sup>

Resíduo		Mundo	Brasil
	Kg/ton de aço	Milhões, ton	Milhões, ton
Pó de Alto-forno	1-2	0,5-1,0	0,02-0,04
Lama de Alto-forno	<1	~0,2	0,001
Pó de Sinterização	15	7	0,3
Lama grossa de Aciaria	5-6	2,5	0,1
Lama Fina de Aciaria	17	8	0,34
Carepa	10-20	7	0,3
Pó de forno a arco elétrico	15	4,6	0,07
Escória de Alto-forno	150-300	140	6,0
Escória de Aciaria	100	47	2,0
Escória de forno a arco elétrico	15	5	0,075

Dados estimados

Muitos resíduos como pó de sinterização, finos de coque, carepa e as escórias, são recuperados com muita eficiência. Portanto, dentre todos os resíduos sólidos gerados na siderurgia, este trabalho dará especial atenção aos pós e lamas gerados no alto-forno e aciaria.



O pó de alto-forno é aquele resíduo recolhido na fase inicial do sistema de limpeza de gases do alto-forno. A lama de alto-forno é gerada no tratamento do efluente líquido da lavagem de gases do alto-forno.

A lama de aciaria é resultante do tratamento do efluente da lavagem dos gases da aciaria. Cerca de 20% da lama de aciaria corresponde à fração grossa, extraída antes da polpa de lavagem dos gases a ser levada ao decantador, chamada lama grossa de aciaria. A lama fina de aciaria, obtida por decantação, é desaguada com o emprego de filtros.

A tabela 2.4 apresenta valores típicos da análise química e umidade destes resíduos, nota-se que eles possuem um teor de ferro considerável.

**Tabela 2.4 - Análise Química dos Resíduos (% em peso)**

<b>Resíduo</b>	<b>Pó de Alto-forno</b>	<b>Lama de Alto-forno</b>	<b>Lama Fina de Aciaria</b>	<b>Lama Grossa de Aciaria</b>
<b>Umidade (%)</b>	15,8	18,9	22,4	7,9
<b>Fet</b>	30,5	39,40	50,8	50,8
<b>Fe</b>	1,48	2,23	7,38	7,38
<b>FeO</b>	4,26	4,26	46,9	46,9
<b>SiO<sub>2</sub></b>	8,83	5,43	0,98	0,98
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,80	0,93	0,082	0,082
<b>CaO</b>	1,54	1,33	17,0	17,0
<b>MgO</b>	0,58	0,66	2,44	2,44
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,095	0,10	0,047	0,047
<b>Mn</b>	0,17	0,25	0,95	0,95
<b>P</b>	0,044	0,054	0,063	0,063
<b>S</b>	0,47	0,47	0,043	0,043
<b>C</b>	41,50	32,60	2,22	2,22
<b>Pb</b>	0,001	0,17	0,050	0,050
<b>Zn</b>	0,043	0,53	0,47	0,47
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,043	0,036	0,10	0,10
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,14	0,094	0,061	0,061

Fonte: CSN – 2003

## 2.4.2 Reciclagem dos Resíduos Sólidos gerados pela Indústrias Siderúrgicas

Existem duas tendências claras para tratar de maneira mais otimizada o problema de geração de resíduos. A primeira, prima pela pesquisa e desenvolvimento de métodos e processos que auxiliem na redução substancial dos resíduos gerados, e a segunda vislumbra o desenvolvimento de técnicas que aumentem a capacidade de reaproveitamento ou reciclagem de resíduos. A solução, “à moda antiga”, de dispor os resíduos em aterros não é mais a de menor custo, além de não ser ecologicamente correta.

Foram surgindo novas tecnologias para utilização do ferro e carbono contidos no pó e na lama provenientes dos processos alto-forno e aciaria:

i) Matéria-prima na sinterização - tradicionalmente a sinterização tem sido usada para reciclar subprodutos na indústria de aço. Existem, portanto, restrições para que os materiais sejam recicláveis. Em particular, a concentração de zinco e alcalinos (sódio e potássio) devem ser controlados para evitar problemas na operação do alto-forno e, similarmente, hidrocarbonetos devem ser controlados para evitar problemas no sistema de limpeza de gás da sinterização (Hartwell, 1996).<sup>(8)</sup>

Resíduos recicláveis podem ter notáveis efeitos na qualidade, resistência e produtividade do sinter e, portanto, a reciclagem de resíduos é limitada dependendo da análise do resíduo (Fleischander et al., 1999). Materiais ultra-finos podem aumentar a emissão de pó, por isso, a sinterização não pode aceitar grande quantidade de pó como carga para o processo (Hyoung-Ky et al., 1995)<sup>(8)</sup>.

Pequena quantidade de materiais finos é necessária na mistura de sinter, mas o excesso de pó tem um efeito negativo na produtividade e na emissão de pó da sinterização.

ii) Injeção de pó de resíduos pelas ventaneiras do alto-forno – devido à alta velocidade do gás, materiais finos não podem ser carregado pelo topo do alto-forno, sendo necessária a aglomeração prévia. Como a aglomeração é um processo caro, Erdmann<sup>(8)</sup> em 1995, sugeriu injetar pó pelas ventaneiras, visando tanto a recuperação de valores de ferro, quanto proceder a dessiliciação do gusa, no entanto, esta técnica é limitada, por causa de problemas de permeabilidade.

iii) Aglomeração dos resíduos para utilizar como carga do alto-forno – segundo Ellis (1999), a presença de sódio, potássio e enxofre no material carregado no alto-forno podem causar problemas operacionais ou composição indesejável do gusa. No entanto, segundo Moore (1999) o maior problema é a concentração de zinco, pois ele forma um circuito no alto-forno resultando em um consumo de combustível extra e há risco de incrustação (formando pontes), além de diminuir a vida do refratário. Há a necessidade de se controlar a concentração de zinco no material carregado no forno, de forma que esta não ultrapasse um limite máximo. Este limite varia de uma siderúrgica para outra, mas geralmente gira em torno de 0,23Kg/ton de gusa. Então, para reciclagem em alto-forno o resíduo deve ser previamente tratado para remoção do zinco. Algum sucesso foi alcançado usando hidro-ciclone, um processo de classificação úmida para tratar lama de alto-forno.<sup>(7)</sup>

iv) Aglomeração dos resíduos para utilizar como carga de Aciaria – esta prática aproxima o uso da aciaria como vaso de redução, diminuindo a capacidade de fusão da sucata e conseqüentemente a produção de aço. Além do mais, o uso destes resíduos briquetados muitas vezes causa o “slopping” (ebulição violenta do metal líquido), resultando em problemas ambientais, diminuição da produtividade, além de comprometer a segurança do processo.

v) Aglomeração dos resíduos para utilizar como matéria-prima dos processos de auto-redução - o processo auto-redução baseia-se na utilização de aglomerados auto-redutores, onde o agente redutor, no caso o carbono, é adicionado diretamente à mistura a ser aglomerada visando, a partir do contato íntimo entre as partículas e a alta pressão parcial dos reagentes, obter alta velocidade de reação e, conseqüentemente, tempos de residência dos aglomerados nos fornos muito curtos. Os processos de auto-redução podem utilizar fornos de soleira rotativa, comumente chamado RHF (Rotary Hearth Furnace), tais como Redsmelt, Itmk3, Fastmet ou, então, utilizar fornos de cuba tais como Tecnoled e Oxocup.<sup>(8)</sup> Duas são as tecnologias principais que se destacam na produção dos aglomerados: a pelotização e a briquetagem.

Pelotização: é o processo destinado à aglomeração de materiais finos, a ser aglomerado que apresentam um elevado índice de pulverização, além de uma

umidade constante. Nesse processo, um aglutinante deve ser utilizado, de modo que o produto aglomerado apresente uma maior resistência mecânica, logo após a sua formação. Quando a aplicação não exige uma resistência muito elevada, as pelotas passam apenas por uma secagem. Quando é necessário uma resistência elevada, para manuseio, torna-se necessário um processo de queima, de modo a tornar as ligações entre as partículas, mais fortes.

Briquetagem: consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados.

## **2.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO ALTO-FORNO**

Até a metade do século passado, o alto-forno era visto como uma “caixa preta” e sua operação era conduzida pela experiência dos alto-fornistas. A partir de dissecações em fornos comerciais, feitas por siderurgistas japoneses na década de setenta, foi que se obteve o conhecimento do funcionamento no interior do alto-forno. A metodologia científica tem sido usada para desenvolver modelos matemáticos para controle e análise do processo.

Modelamentos matemáticos desenvolvidos para simulação, análise e controle de processo têm se mostrado muito eficiente e tem contribuído de forma decisiva para a redução de custos em pesquisas e desenvolvimentos direcionados à elaboração do aço, além de proporcionar um maior embasamento teórico para análise e otimização do processo. <sup>(9)</sup>

A representação matemática dos diversos fenômenos que ocorrem no alto-forno apresenta um elevado nível de complexidade devido ao grande número de fenômenos físico-químicos inter-relacionados tais como secagem, redução dos óxidos, fusão, escoamento de gases em leito poroso, troca de calor entre sólidos, líquidos, gases, etc.

### 2.5.1 Evolução dos Modelos Matemáticos para Alto-forno

A seguir é feito um histórico da evolução dos modelos matemáticos desenvolvidos para o alto-forno:

Desde a década de vinte que procura-se desenvolver modelos matemáticos que possam prever o comportamento do alto-forno. Um dos primeiros modelos desenvolvido foi o Diagrama de Reichard, que divide o alto-forno em cinco zonas distintas em função do calor necessário para a transformação da carga. O diagrama era usado para otimizar a operação de forma a obter um melhor aproveitamento do gás. A limitação do modelo era determinação precisa dos limites das zonas e as taxas de reação.

Já, Michard e colaboradores, em 1963, propuseram o modelo termoquímico, que estabelece duas zonas distintas, determinadas pela reatividade do coque chamadas zona de preparação (a carga entra fria e oxidada e sai pré-aquecida e pré-reduzida ao estado de wustita) e a zona de elaboração (a carga proveniente da zona de preparação chega ao estado de gusa e escória). Este modelo determina um parâmetro capaz de medir o desvio da idealidade de um reator, que é caracterizada como a utilização total do poder redutor do gás na zona de preparação. Rist baseou-se neste modelo para montar uma reta operatória para análise do processo alto-forno.

Koump et al, em meados da década de sessenta, pela primeira vez formularam os fenômenos no interior do alto-forno como um sistema de equações diferenciais. Uma região do forno foi formulada matematicamente e constituiu-se em um sistema de seis equações diferenciais de primeira ordem, que representam os balanços de massas e térmicos para um disco diferencial, portanto um problema de valor inicial.

Muchi, em 1967, desenvolveu um modelo semelhante ao de Koump, porém abrangendo três regiões do forno e adicionalmente aplicou uma equação de transporte de momentum, à equação de Ergun.

A primeira tentativa de se desenvolver um modelo bidimensional foi feita por Lahiri e Seshadri (1969), onde se expandia as equações de transporte de energia e de massa, mas as equações de transporte de momentum ainda eram mantidas na formulação unidimensional.

Chon e Tate (1975) propuseram um modelo muito simples, onde se conseguem alguns resultados satisfatórios. Neste modelo o alto-forno foi dividido em três regiões tubulares (zona periférica, zona intermediária e zona central).

Em 1980, Hatano e Kurita propuseram um modelo bidimensional, considerando três fases (gás, sólido e líquido) e reações químicas. Foram usadas equações simplificadas para simular o movimento e o fenômeno químico. Neste mesmo ano, Yagi et al utilizaram, pela primeira vez, o método de elementos finitos para solução das equações de transporte. Até aqui o histórico foi baseado no trabalho de Castro<sup>(1)</sup>.

Segundo Yagi et al<sup>(10)</sup> o modelo Bright, desenvolvido por Sugiyama e Sugata para a Nippon Steel Corporation (1987), apresentou bastante conformidade com os resultados de medições. Este modelo utiliza uma filosofia de modelos específicos (modelo da carga, escoamento gasoso, escoamento do sólido, escoamento do líquido e modelo térmico) interconectados em um modelo global. Um modelo efetivo que inclui quase todas as funções do processo alto-forno e propriedades da matéria-prima.

Em 1990, Takani et al formularam um modelo tridimensional, considerando as fases gás, líquido e sólido. As reações no raceway foram tratadas de forma simplificada, bem como a constante de velocidade e transformações de fase.

Castro<sup>(9)</sup>, em 1996, desenvolveu um modelo bidimensional que resolve as equações de transporte com condições de contorno apropriadas, adotando-se a filosofia de desacoplamento parcial, através de submodelos e iterações sucessivas destes modelos até a convergência. O diferencial do modelo bidimensional de Castro é que a zona coesiva é uma consequência das condições operacionais, isto é, seu posicionamento e forma, são obtidos como resultado no final da convergência global do modelo.

Castro<sup>(1)</sup>, em 2000, formulou um modelo matemático multidimensional, considerando múltiplas fases interagindo simultaneamente dentro do forno., trocando momentum, energia e massa e, além disso, incluiu mudança de propriedades físicas. Ao longo dos últimos anos este modelo vem sendo aprimorado, tornando-se mais sensível em relação aos parâmetros de controle de qualidade do gusa, como no trabalho realizado por Matos<sup>(12)</sup>, em 2006. Castro et al<sup>(13,14,15)</sup> vêm adaptando o modelo realizando pesquisas com os mais diferentes modos de operação do alto-forno.

## **2.6 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO - FORTRAN**

A linguagem FORTRAN foi a primeira linguagem de programação de alto nível a ser proposta (surgiu em 1956). Foi sugerida visando a resolução de problemas da área científica, através do uso de computadores. É uma das linguagens mais difundidas no meio técnico-científico, tendo sido ao longo do tempo aprimorada, constituindo as diversas versões disponíveis.<sup>(18)</sup>

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Modelo Matemático

O modelamento matemático aplicado neste trabalho é o modelo implementado por Castro<sup>(1)</sup>. Trata-se de um modelo multi-dimensional, transiente e multi-fásico capaz de formular os fenômenos que ocorrem no interior do alto-forno. O modelo é baseado na Teoria do Multi-fluido, na qual cada fase se comporta como um fluido e interagem uma com as outras. No alto-forno, sólidos, gases, gusa, escória, carvão e finos gerados por degradação de materiais sólidos ou introduzidos através das ventaneiras(carvão pulverizado) coexistem e interagem entre si trocando movimento, massa e energia. A interação simultânea das fases inclui mudanças nas propriedades físicas, como densidade, viscosidade, condutividade térmica, calor específico e difusividade, por todo o forno.

A figura 3.1 mostra o diagrama de interação entre as fases consideradas nesta dissertação: *sólidos*, que compreende sinter, redutor granulado (*small coque* ou carvão vegetal), agentes escorificantes e aglomerados; a fase *gasosa* corresponde ao sopro e gases gerados pelas diversas reações químicas; as fases líquidas, *gusa e escória; carvão pulverizado e finos*. As setas tracejadas indicam somente transferência de massa entre as fases e as setas cheias indicam interação completa, massa, movimento e energia.

As fases sólido e gás interagem totalmente com todas as outras fases. Portanto, fases sólida e gás trocam massa, movimento e energia com todas as outras. As demais fases não trocam momentum e energia entre si, embora haja troca de massa através de reações químicas e transformações físicas.



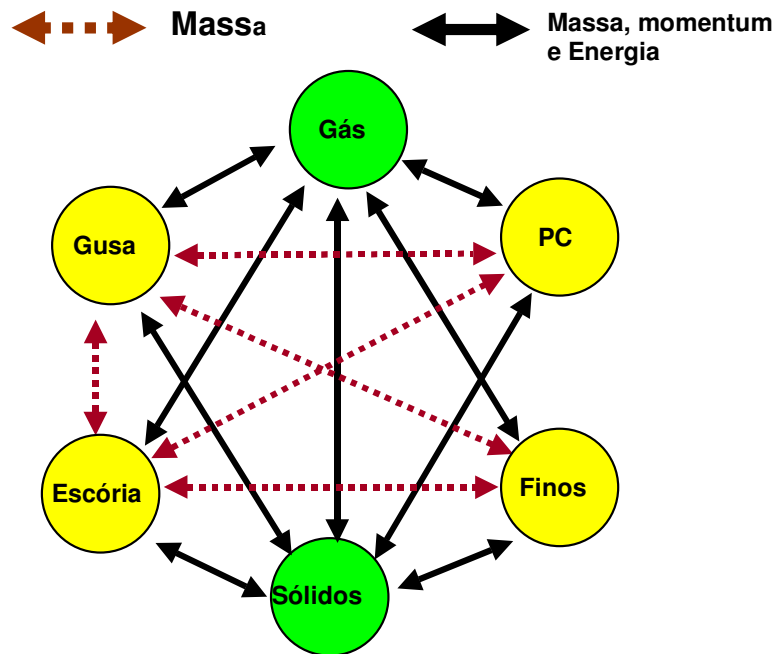


Figura 3.1 - Diagrama de interação entre as fases

### 3.1.1 Equações de Conservação

Para modelar o processo de redução, os diferentes comportamentos com relação à movimento relativo, composição e propriedades termo-físicas devem ser considerados detalhadamente e os efeitos das variações das propriedades termo-físicas em tais fenômenos devem ser levados em conta. O comportamento multi-fásico do alto-forno requer uma formulação de parâmetros de interação entre fases baseados em equações fundamentais desenvolvidas por trabalhos teóricos ou experimentais.

A teoria de múltiplos fluidos oferece a possibilidade de introdução de interações com outras fases, assim como a auto-interação através do princípio geral representado pela equação de conservação geral.

Equações de conservação para todas as fases estão expressas em uma única equação geral, representada pela equação (3.1), que independe do sistema de coordenadas.

$$\frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i \phi_i)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_i \rho_i \bar{U}_i \phi_i) = \text{div}(\varepsilon_i \Gamma_{\phi_i} \text{grad } \phi_i) + S_{\phi_i} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i \phi_i)}{\partial t} - \text{Termo transiente}$$

$$\text{div}(\varepsilon_i \rho_i \bar{U}_i \phi_i) - \text{Termo convectivo}$$

$$\text{div}(\varepsilon_i \Gamma_{\phi_i} \text{grad } \phi_i) - \text{Termo difusivo}$$

$$S_{\phi_i} - \text{Termo Fonte}$$

Na equação 3.1, o subscrito  $i$  representa a fase considerada ( $i$ = gás, sólido, gusa, escória, pc e finos).  $\Gamma_{\phi}$  é o coeficiente de transferência efetiva, que depende da variável de estado a ser resolvida. Por instante, se a equação de conservação geral é de conservação de quantidade de movimento o coeficiente de transferência assume a viscosidade dinâmica, enquanto que se a equação de conservação é de energia, então o coeficiente de transferência assume a condutividade térmica. A composição da fase é calculada usando a equação de conservação 3.1 com a fração em massa de cada componente caracterizado como variável dependente.

A tabela 3.1 mostra as fases com suas respectivas espécies químicas resolvidas no modelo.

Tabela 3.1 Fases e espécies químicas resolvidas no modelo

Fases	Espécies químicas	
<b>Gás</b>	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , N <sub>2</sub> , SiO, Mn	
<b>Sólido</b>	Sínter	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, ganga
	Aglomerados	C, Voláteis, SiC, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, <b>Na<sub>2</sub>O</b> , <b>K<sub>2</sub>O</b> , <b>ZnO</b> , ganga
	Agentes escorificantes	MgO, SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ganga
	Coque ou Carvão Vegetal	C, SiC, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, H <sub>2</sub> O, CaS, ganga
<b>Gusa</b>	Fe, C, Si, P,S,Mg, Mn	
<b>Escória</b>	FeO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, MnO, CaS, ganga	
<b>Carvão Pulverizado</b>	C, voláteis, SiC, CaO, MgO, H <sub>2</sub> O, CaS, ganga	
<b>Finos</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, <b>Na<sub>2</sub>O</b> , <b>K<sub>2</sub>O</b> , <b>ZnO</b> , C, ganga	

### 3.1.2 Termo Fonte

Os termos fontes das equações de conservação levam em conta, por exemplo, as reações químicas, interações entre as fases, força externa e mudanças de fase.

*As fontes de momentum* podem aparecer por causa do arraste entre as fases, gradientes de pressão (fases contínuas) ou gravidade (fases descontínuas). A tabela (3.2) relaciona as equações para cálculo dos coeficientes de cada interação.

**Tabela 3.2** Termos fonte de momentum para a equação geral de conservação segundo Castro (2000)

Fase	Termo fonte
Gás	$S_{\phi} = -\text{grad}[P_g] - \vec{F}_g^s - \vec{F}_g^{hm} - \vec{F}_g^{slg} - \vec{F}_g^{pc} - \vec{F}_g^f$
Sólido	$S_{\phi} = -\text{grad}[P_s] - \vec{F}_s^g$
Gusa	$S_{\phi} = -\vec{F}_{hm}^s - \vec{F}_{hm}^g + \rho_{hm} \epsilon_{hm} \vec{g}$
Carvão	$S_{\phi} = -\vec{F}_{pc}^s - \vec{F}_{pc}^g + \rho_{pc} \epsilon_{pc} \vec{g}$
Escória	$S_{\phi} = -\vec{F}_{slg}^s - \vec{F}_{slg}^g + \rho_{slg} \epsilon_{slg} \vec{g}$

As fontes de entalpia vêm da transferência de calor entre as fases, calor de reação e transferência de calor sensível acompanhada de transferência de massa devido às reações químicas e transformações de fase. A tabela (3.3) relaciona as equações para cálculo dos coeficientes de cada interação.

**Tabela 3.3** Termos fonte de energia segundo Castro(2000)

Fase	Termo fonte
Gás	$S_{\phi} = -\dot{E}_g^s - \dot{E}_g^{hm} - \dot{E}_g^{slg} - \dot{E}_g^{pc} - \dot{E}_g^f + \sum R_n \Delta H_n$
Sólido	$S_{\phi} = -\dot{E}_s^g - \dot{E}_s^{hm} - \dot{E}_s^{slg} - \dot{E}_s^{pc} - \dot{E}_s^f + \sum R_n \Delta H_n$
Gusa	$S_{\phi} = -\dot{E}_{hm}^g - \dot{E}_{hm}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Carvão	$S_{\phi} = -\dot{E}_{pc}^g - \dot{E}_{pc}^s + \sum R_n \Delta H_n$
Escória	$S_{\phi} = -\dot{E}_{slg}^g - \dot{E}_{slg}^s + \sum R_n \Delta H_n$

### 3.1.2.1 Fontes de momentum

A seguir é apresentada a formulação das fontes de momentum, conforme aplicadas no modelo de Castro<sup>(1)</sup>:

O arraste gás-sólido usa a equação de Ergun para representar o escoamento do gás através da *packed bed*. Portanto, a *packed bed* no alto-forno é composta por

camadas alternadas de carga metálica e combustível sólido, as quais geralmente apresentam uma permeabilidade bem diferente.

$$F_m = 150\mu_g \frac{1}{\left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right|} \left( \frac{\varepsilon_m}{(1-\varepsilon_m) d_m \varphi_m} \right)^2 + 1.75\rho_g \left( \frac{\varepsilon_m}{(1-\varepsilon_m) d_m \varphi_m} \right) \quad (3.2)$$

Onde m representa o componente da carga (m= coque/carvão vegetal, minério, sínter, pelotas, etc). Assim, as forças perpendicular e paralela para cada camada são determinadas pelo seguinte:

$$F_{\text{perp}} = \sum_m f_m F_m \quad (3.3)$$

e

$$\frac{1}{\sqrt{F_{\text{para}}}} = \sum_m \frac{f_m}{\sqrt{F_m}} \quad (3.4)$$

Por consideração geométrica do coeficiente anisotrópico gás-sólido (vetores de projeção) podem ser avaliados pela seguinte expressão geral, a qual leva em conta o ângulo da camada sólida ( $\theta$ ).

$$\vec{F}_g^s = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{\text{perp}} & 0 \\ 0 & F_{\text{para}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right| \left( \vec{U}_g - \vec{U}_s \right) \quad (3.5)$$

Para as interações gás-líquido e gás-pó, uma equação de arraste de partícula única é usada. O coeficiente de arraste na equação aqui usada foi modificado por Richardson e Zaki para levar em consideração a existência de partículas vizinhas.

$$\vec{F}_g^i = -C_{d_{g-i}} \left[ \frac{3\varepsilon_i \rho_i}{4d_i \varphi_i} \right] \left| \vec{U}_g - \vec{U}_i \right| \left( \vec{U}_g - \vec{U}_i \right) \quad (3.6)$$

onde

$$C_{d_{g-i}} = \left[ \frac{24}{Re_{g-i}} (1 + a Re_{g-i}^b) + \frac{c}{1 + \frac{d}{Re_{g-i}}} \left( \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_i} \right)^{-4.65} \right] \quad (3.7)$$

Onde  $i$  representa o gusa, escória, pc e finos.

**a, b, c, d** são funções do fator de forma da partícula ( $\varphi$ ) descritas pelo seguinte:

$$\ln(\mathbf{a}) = 2.3288 - 6.4581 \varphi_i + 2.448 \varphi_i^2$$

$$\mathbf{b} = 0.0964 + 0.5565 \varphi_i$$

$$\ln(\mathbf{c}) = 4.905 - 13.8944 \varphi_i + 18.4222 \varphi_i^2 - 10.2599 \varphi_i^3$$

$$\ln(\mathbf{d}) = 1.4681 + 12.2584 \varphi_i - 20.7322 \varphi_i^2 + 15.8855 \varphi_i^3$$

O parâmetro de interação sólido-líquido usa a equação de Kozeny-Carman modificada para se assegurar o significado físico na condição extrema onde a fração de volume líquido é muito baixa.

$$\vec{F}_s^1 = \frac{\rho_l}{r_h} \left| \vec{U}_1 - \vec{U}_s \right| \left( 5\beta + 0.4\beta^{0.1} \right) \left( \vec{U}_1 - \vec{U}_s \right) \quad (3.8)$$

e

$$\beta = \frac{\mu_l}{\rho_l \left| \vec{U}_1 - \vec{U}_s \right| r_h} \quad (3.9)$$

onde

$$r_h = \frac{\varepsilon_l \varphi_s d_s}{6\varepsilon_s} \quad (3.10)$$

O parâmetro de interação sólido-pó é baseado na correlação experimental de um experimento modelo frio com parâmetros adimensionais, os quais incluem parâmetros de interação horizontal e vertical.

$$\vec{F}_s^i = \frac{F_k}{2D} \varepsilon_i \rho_i \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| \left( \vec{U}_i - \vec{U}_s \right) \quad (3.11)$$

e

$$D = \frac{2d_s \varphi_s}{3\varepsilon_s} (1 - \varepsilon_s) \quad (3.12)$$

onde

$$Fr = \frac{\left| \vec{U}_s - \vec{U}_i \right|}{\sqrt{gD}} \quad (3.13)$$

*i* – fases pc ou finos

O coeficiente de interação  $F_k$  está relacionado à direção de escoamento pela seguinte correlação  $F_k = 10.50 (F_r)^{-1.33}$  para a direção vertical e  $F_k = 14.98 (F_r)^{-1.33}$  para a direção horizontal. Tais correlações foram obtidas pela faixa de número de Froude de 0,5 a 0,03.

O coeficiente de arraste líquido-pó não está incluso no modelo devido à falta de dados de trabalhos teóricos e experimentais.

### 3.1.2.2 Fontes de Energia

A seguir é apresentada a formulação das fontes de energia, conforme aplicadas no modelo de Castro<sup>(1)</sup>:

A fonte de energia devido a transferência de calor por convecção é calculada por:

$$\dot{E}_i^j = h_{i-j} A_{i-j} [T_i - T_j] \quad (3.14)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção gás-sólido é calculado usando a equação de Ranz-Marshall, modificada por Akiyama para uso na movimentação das camadas.

$$h_{g-s} = \frac{k_g}{d_s} \left[ 2.0 + 0.39 (Re_{g-s})^{0.5} (Pr_g)^{1/3} \right] \quad (3.15)$$

O coeficiente de transferência de calor sólido-líquido é derivado considerando-se a força de transferência de calor em ambos, contorno interfacial da camada no lado líquido, e força condutiva no lado sólido. O termo de força do lado líquido usa uma

expressão adequada para metais líquidos, os quais, geralmente, têm um baixo número de Prandtl.

$$\frac{1}{h_{i-s}} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_i} \quad (3.16)$$

$$h_i = \frac{k_i}{d_s} \left[ \frac{2\sqrt{\text{Re}_{s-i} \text{Pr}_i}}{1.55\sqrt{\text{Pr}_i} + 3.09\sqrt{0.372 - 0.15\text{Pr}_i}} \right] \quad (3.17)$$

e

$$h_s = 2\sqrt{\frac{k_s C_p \rho_s \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right|}{\pi d_s}} \quad (3.18)$$

*i* – gusa ou escória

O coeficiente de transferência de calor por convecção de sólido-pó deriva-se de um modelo de emulsão do sistema de gás-pó.

$$h_{\text{eff}} = 2\sqrt{\frac{k_{\text{eff}} (C_p \rho_s)_{\text{eff}}}{\pi t_{\text{c,eff}}}}; \quad (3.19)$$

$$t_{\text{c,eff}} = \frac{(\varepsilon_g - \varepsilon_i)}{(|U_{\text{eff}}|) A_s} \quad (3.20)$$

$$\psi_{\text{eff}} = \frac{(\varepsilon_g \psi_g + \varepsilon_i \psi_i)}{\varepsilon_g + \sum \varepsilon_i} \text{ for } \psi = k, \rho C_p \text{ and } |U| \quad (3.21)$$

*i* – pci ou finos

Para cada gás, líquido e fino, a transferência de calor entre as fases para sólidos é dada pelo produto do coeficiente de transferência de calor por convecção, área interfacial e diferença de temperatura. Considerando a transferência de calor entre as três fases restantes, a fonte de transferência de calor gás-líquido é calculada pela correlação de Mackey e Warner para o gusa gotejando através das *packed bed*.



$$h_{g-i} A_{g-i} = 4.55 \left[ \epsilon_g \rho_g U_g C_{p,g} (\epsilon_i U_i)^{0.35} \right] Re_{g-i}^{-0.37} \left[ \frac{Sc_g}{Pr_g} \right]^{2/3} \quad (3.22)$$

O coeficiente de transferência de calor gás-pó é calculado pela equação de Ranz-Marshall

$$h_{g-i} = \frac{k_g}{d_i} \left[ 2.0 + 0.6 (Re_{g-i})^{0.5} (Pr_g)^{1/3} \right] \quad (3.23)$$

Finalmente, a transferência de calor por convecção direta líquido-pó não é considerada, novamente, devido à falta de dados experimentais. As área de contato na Equação (2.23) são dadas a seguir:

Superfície específica do sólido:

$$A_s = \sum_m f_m \frac{6\epsilon_m}{d_m \varphi_m} \quad (3.24)$$

Sólido-líquidos (escória e gusa) são calculados pela correlação de Niu's.

$$\frac{A_{s-i}}{A_s} = 0.400 Re_{s-i}^{0.218} We_{s-i}^{0.0428} Fr_i^{-0.0238} [1 + \cos \theta_{s-i}]^{-0.0235} \quad (3.25)$$

A superfície de sólido restante é dividida entre a fase de gás e as fase de finos, basedos nas suas frações de volume.

$$A_{s-i} = \left( \frac{\epsilon_i}{\epsilon_g + \sum_{i \in \text{powders}} \epsilon_i} \right) \left[ A_s - \sum_{j \in \text{liquid}} A_{s-j} \right] \quad (3.26)$$

### 3.1.2.3 Fontes de Massa

Fontes de massa são devido às reações químicas e transformações de fase, que podem ocorrer durante o processo, e serão determinadas como uma função das taxas de reação, ou seja, a velocidade com a qual reagentes são transformados em produtos. A equação (3.27) calcula o termo fonte da fração mássica da espécie em questão.

$$S_k = M_k \sum R_k \quad (3.27)$$

O modelo total do alto-forno convencional considera aproximadamente 120 diferentes possíveis reações, sendo as principais: redução direta e indireta do óxido de ferro. A redução indireta envolve CO e H<sub>2</sub>. A redução direta envolve carbono do coque como redutor da wustita. Esta reação é fortemente endotérmica e é modelada por uma reação de taxa de segunda ordem. As reações de oxidação do carbono na raceway, o carbono das fases sólida e pó, sofrem combustão parcial pelo CO ou total pelo CO<sub>2</sub>.

As reações de *solution loss* e *water gas* consomem carbono, elas usualmente acontecem onde a temperatura do gás está em torno de 900°C. As taxas das reações de *solution loss* e *water gas* misturam difusão e controle cinético. A reação de *water gas shift* é uma reação homogênea reversível na fase gasosa, mantendo equilíbrio entre carbono e hidrogênio. Isto é modelado por uma equação de taxa de segunda ordem.

Voláteis em pós que contém carbono são consumidos por O<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>. Note que a estequiometria das reações voláteis dependem da composição dos voláteis e que assume-se que a desvolatilização do pó ocorre na mesma taxa de consumo dos voláteis, assim não é considerada explicitamente.

A transferência de silício é um importante processo secundário do forno. O silício entra no forno como sílica na ganga e cinzas, e talvez parcialmente reduzido em SiC sólido ou SiO gasoso. O SiO gasoso se re-oxida no resfriamento ou é reduzido no contato com o gusa. As reações de redução da sílica do coque e do SiC são modeladas como reações completamente reversíveis, permitindo que a recirculação do silício ocorra. As reações de redução da sílica da escória e do SiO do gás-metal são irreversíveis.

Outras importantes reações a serem consideradas no presente trabalho são as decorrentes da presença do Zn e dos alcalinos K, Na, visto que ao carregar aglomerados auto-redutores, fabricados a partir de resíduos siderúrgicos, é inevitável a presença de compostos destes elementos. Portanto a formulação do mecanismo de reação do Zn, K e Na para implementação do modelo de Castro é apresentado na seção 3.1.3

A tabela 3.4 apresenta as principais reações, sendo que os subscritos das espécies químicas indicam as fases das quais elas se originam, que são representadas nas equações pelo seguinte:

*fo* – finos gerados da degradação dos sólidos

*forg* – finos gerados da degradação do redutor granulado (coque ou carvão vegetal, conforme o caso)

*fos* – finos gerados da degradação do sinter e aglomerados auto-redutores

*g* – gás

*hm* – gusa

*slg* – escória

*pc* – carvão pulverizado

*s, a, rg* – sólido, ou seja, sinter, aglomerados auto-redutores, redutor granulado, respectivamente.

**Tabela 3.4** Principais reações químicas<sup>(1)</sup>

<b>Redução direta pelo CO</b>		
1 <sub>i</sub>	$\text{Fe}_2\text{O}_3(i) + \text{CO}(g) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
2 <sub>i</sub>	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{CO}(g) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
3 <sub>i</sub>	$\text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{CO}(g) \rightarrow w\text{Fe}(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
<b>Redução indireta pelo H<sub>2</sub></b>		
4 <sub>i</sub>	$\text{Fe}_2\text{O}_3(i) + \text{H}_2(g) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{H}_2\text{O}(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
5 <sub>i</sub>	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{H}_2(g) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{H}_2\text{O}(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
6 <sub>i</sub>	$\text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{H}_2(g) \rightarrow w\text{Fe}(i) + \text{H}_2\text{O}(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
<b>Redução direta pelo carbono</b>		
7 <sub>i</sub>	$\text{Fe}_w\text{O}(slg) + \text{C}(i) \rightarrow \text{Fe}(hm) + \text{CO}(g)$	<i>i= s, a, fos</i>
<b>Combustão</b>		
8 <sub>i</sub>	$\text{C}(i) + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) \rightarrow \text{CO}(g)$ (parcial)	<i>i= rg, pc, forg</i>
9 <sub>i</sub>	$\text{C}(i) + \text{O}_2(g) \rightarrow \text{CO}_2(g)$ (total)	<i>i= rg, pc, forg</i>
<b>Solution loss</b>		
10 <sub>i</sub>	$\text{C}(i) + \text{CO}_2(g) \rightarrow 2\text{CO}(g)$	<i>i= rg, pc, forg</i>

<b>Water gas</b>		
11 <sub>i</sub>	$C(i) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$	$i = rg, pc, forg$
<b>Water gas shift</b>		
12	$CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$	
<b>Combustão de voláteis</b>		
13	$voláteis(pc) + \alpha_1 O_2 \rightarrow \alpha_2 CO_2(g) + \alpha_3 H_2O(g) + \alpha_4 N_2(g)$	
14	$voláteis(pc) + \alpha_5 CO_2(g) \rightarrow \alpha_6 CO(g) + \alpha_7 H_2(g) + \alpha_8 N_2(g)$	
<b>Redução da sílica do coque</b>		
15	$SiO_2(rg) + C(rg) \leftrightarrow SiO(g) + CO(g)$	
16	$SiO_2(rg) + 3C(rg) \leftrightarrow SiC(rg) + 2CO(g)$	
17	$SiC(rg) + CO(g) \leftrightarrow SiO(g) + 2C(rg)$	
<b>Metal/escória</b>		
18	$SiO_2(slg) + C(rg) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$	
19	$SiO(g) + C(hm) \rightarrow Si(hm) + CO(g)$	
<b>Reações do gás natural</b>		
20	$CH_4(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g) + 2H_2(g)$	
21	$CH_4(g) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g) + 2H_2(g)$	
22	$C_2H_6(g) + O_2(g) \rightarrow 2CO(g) + 3H_2(g)$	
23	$C_2H_6(g) + 2CO_2(g) \rightarrow 4CO(g) + 3H_2(g)$	
24	$C_3H_8(g) + \frac{3}{2} O_2(g) \rightarrow 3CO(g) + 4H_2(g)$	
25	$C_3H_8(g) + 3CO_2(g) \rightarrow 6CO(g) + 4H_2(g)$	
26	$C_4H_{10}(g) + 2O_2(g) \rightarrow 4CO(g) + 5H_2(g)$	
27	$C_4H_{10}(g) + 4CO_2(g) \rightarrow 8CO(g) + 5H_2(g)$	
<b>Fusão</b>		
28 <sub>i</sub>	$Fe(i) \rightarrow Fe(hm)$	$i = s, a$
29 <sub>i</sub>	$Fe_w O(i) \rightarrow Fe_w O(slg)$	$i = s, a$
30 <sub>i</sub>	$SiO_2(i) \rightarrow SiO_2(slg)$	$i = s, a$
31 <sub>i</sub>	$Al_2O_3(i) \rightarrow Al_2O_3(slg)$	$i = s, a$
32 <sub>i</sub>	$CaO(i) \rightarrow CaO(slg)$	$i = s, a$
33 <sub>i</sub>	$MgO(i) \rightarrow MgO(slg)$	$i = s, a$
34	Scrap $\rightarrow$ Fe(hm) + C(hm) + Si(hm)	
35 <sub>i</sub>	$Gangue(i) \rightarrow Gangue(slg)$	$i = s, a$

<b>Dissolução do carbono</b>		
36	$C(\text{coke}) \rightarrow C(\text{hm})$	
<b>Evaporação</b>		
37 <sub>i</sub>	$H_2O(i) \rightarrow H_2O(g)$	$i = \text{rg, pc, fo}$
<b>Transferência de massa devido ao processo de degradação</b>		
38 <sub>i</sub>	$Fe_2O_3(i) \rightarrow Fe_2O_3(\text{fo})$	
39 <sub>i</sub>	$Fe_3O_4(i) \rightarrow Fe_3O_4(\text{fo})$	
40 <sub>i</sub>	$Fe_wO(i) \rightarrow Fe_wO(\text{fo})$	
41 <sub>i</sub>	$Fe(i) \rightarrow Fe(\text{fo})$	
42 <sub>i</sub>	$C(\text{rg}) \rightarrow C(\text{pc})$	
43 <sub>i</sub>	$SiO_2(i, \text{rg}) \rightarrow SiO_2(\text{fo, pc})$	
44 <sub>i</sub>	$Al_2O_3(i, \text{rg}) \rightarrow Al_2O_3(\text{fo, pc})$	
45 <sub>i</sub>	$CaO(i, \text{rg}) \rightarrow CaO(\text{fo, pc})$	
45 <sub>i</sub>	$MgO(i, \text{rg}) \rightarrow MgO(\text{fo, pc})$	
47 <sub>i</sub>	$\text{Gangue}(i, \text{rg}) \rightarrow \text{Gangue}(\text{fo, pc})$	
$i = \text{s, a}$		

### 3.1.3 Implementação do mecanismo de reações dos álcalis e zinco

Neste trabalho, são implementadas ao modelo as reações do zinco, sódio e potássio. Óxidos destes elementos entram no forno, em pequenas quantidades, via aglomerados auto-redutores fabricados a partir de resíduos siderúrgicos. Na parte mais baixa do forno, vapor de K, Na e Zn são gerados pela reação com CO ( $K_2O$  e  $ZnO$ ) ou  $H_2$  ( $Na_2O$ ) da fase gás. Os vapores de K, Na e Zn ascendem juntamente com o gás e são reoxidados na parte mais alta do forno, onde parte escapa pelo coletor de pó e o resto desce com os sólidos para a zona de alta temperatura sendo novamente reduzido formando assim um ciclo dentro do forno. A tabela 3.5 mostra as reações químicas que ocorrem com esses elementos dentro do forno com suas respectivas taxas.

**Tabela 3.5** Taxas de reação do zinco, sódio e potássio

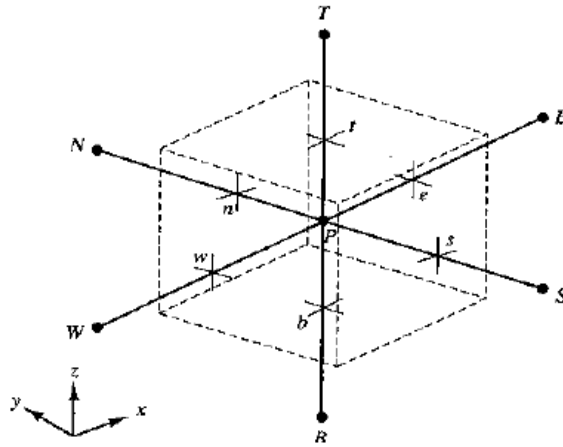
$\text{ZnO}(i) + \text{CO}(g) \leftrightarrow \text{Zn}(g) + \text{CO}_2(g)$
$R_i = K[\text{ZnO}](\text{CO} - \text{CO}^*)$
$K = A_0 T^n \exp\left[-\frac{\Delta E}{RT}\right]$
$\text{CO}^* = \frac{k_1 k_2}{k_3}$
$k_1 = \exp\left(-13.55 + \frac{21434}{T_i}\right); \quad k_2 = \exp\left(-20.91 + \frac{20339}{T_i}\right); \quad k_3 = \exp\left(-13.34 + \frac{15071}{T_i}\right)$
$\text{Na}_2\text{O}(i) + \text{H}_2(g) \leftrightarrow 2\text{Na}(g) + \text{H}_2\text{O}(g)$
$R_i = K[\text{Na}_2\text{O}](\text{H}_2 - \text{H}_2^*)$
$K = A_0 T^n \exp\left[-\frac{\Delta E}{RT}\right]$
$\text{H}_2^* = \frac{k_1 k_2}{k_3}$
$k_1 = \exp\left(-25.74 + \frac{39006}{T_i}\right); \quad k_2 = \exp\left(-6.71 + \frac{29757}{T_i}\right); \quad k_3 = \exp\left(-11.41 + \frac{12497}{T_i}\right)$
$\text{K}_2\text{O}(i) + \text{CO}(g) \leftrightarrow 2\text{K}(g) + \text{CO}_2(g)$
$R_i = K[\text{K}_2\text{O}](\text{CO} - \text{CO}^*)$
$K = A_0 T^n \exp\left[-\frac{\Delta E}{RT}\right]$
$\text{CO}^* = \frac{k_1 k_2}{k_3}$
$k_1 = \exp\left(-20.13 + \frac{23659}{T_i}\right); \quad k_2 = \exp\left(-20.91 + \frac{20339}{T_i}\right); \quad k_3 = \exp\left(-10.7 + \frac{10440}{T_i}\right)$

Sendo  $A_0$ ,  $n$  e  $\Delta E$  estimados.

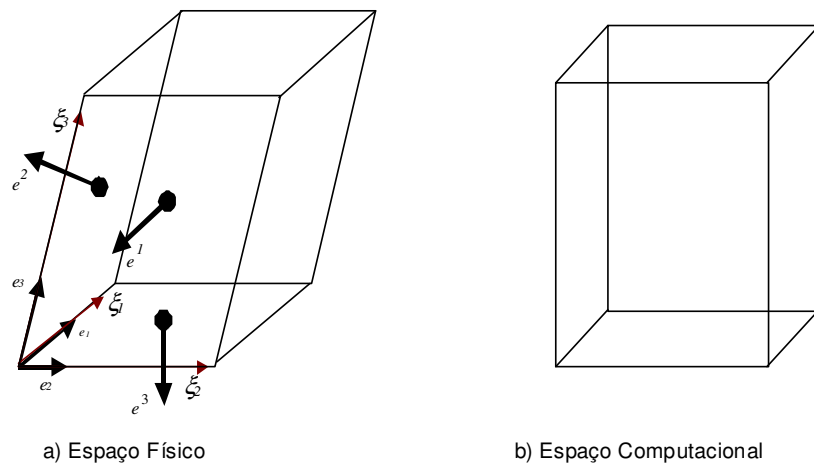
### 3.1.4 Método de Solução Numérica

O alto-forno pode ser representado com precisão por um *grid* numérico tipo *Body Fitted Coordinate* (BFC). As equações de governo são discretizadas nesse *grid* numérico usando o método do volume de controle. Isto reduz as equações diferenciais a um grande número de equações lineares fortemente acopladas e este sistema pode ser resolvido usando o método linha por linha.

A molécula computacional para discretização da equação de conservação geral é como mostra a figura (3.2), onde a conexão entre o ponto e seus vizinhos é dada pela equação de discretização. O volume de controle, formado arbitrariamente no espaço físico, é transformado em cubos no espaço computacional e as informações necessárias sobre a transformação de coordenadas são fornecidas pelo vetor área e o Jacobiano da transformação de coordenada. De acordo com a formulação do volume de controle, as equações diferenciais são integradas diretamente no domínio físico e depois as relações entre os domínios físico e computacional são introduzidas. A figura (3.3) ilustra o conceito da transformação de coordenada física para a computacional.



**Figura 3.2** Volume de Controle



**Figura 3.3** Transformação de Coordenadas usadas para tratar a irregularidade geométrica

Para as fases contínuas assume-se que possuem um campo de pressão. Para estas fases o modelo resolve as equações de movimento usando o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linqued Equation*) descrito por Pantakar e Spalding para tratar o acoplamento pressão-velocidade. Já para as fases



descontínuas, o esquema SIMPLE não pode ser aplicado. Alternativamente, a equação da continuidade é usada para calcular a distribuição volumétrica da fase. A informação adicional fica por conta da equação (3.7), que é usada para determinar a fração volumétrica do gás.

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s + \varepsilon_{hm} + \varepsilon_{slg} + \varepsilon_{pc} + \varepsilon_f = 1 \quad (3.28)$$

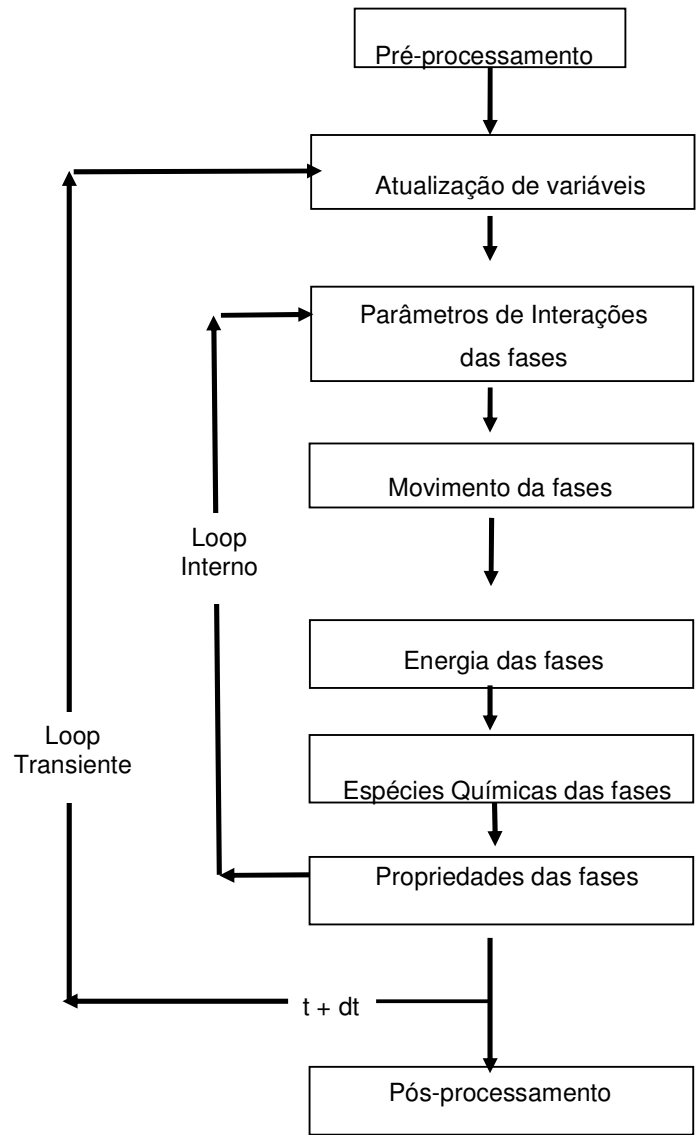
A fração volumétrica do sólido pode ser obtida pelas equações empíricas, descritas abaixo, para o coque e outros componentes.

$$\varepsilon_{coque} = 1. - [0,153 \log(d_c) + 0,724] \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_k = 1. - 0,403 [100d_k]^{0,14} \quad (3.30)$$

(k = sínter e aglomerado auto-redutor)

O procedimento de cálculo foi implementado na linguagem de programação FORTRAN e é dividido em três partes: o pré-processamento, são estipuladas as inicializações das variáveis dependentes e propriedades das fases, dados de entrada, como parâmetros operacionais, geometria do alto-forno e finalmente a geração do *grid* numérico e as informações geométricas são computadas. A segunda parte é o processamento, centro do modelo, onde as variáveis dependentes e propriedades físicas das fases são interativamente calculadas. E finalmente no pós-processamento são gerados os gráficos de saída e armazenagem de dados. Na figura 3.4 está representado o *flow chart* do modelo.



**Figura 3.4** *Flow Chart* do Modelo Matemático

## 3.2 Processo Estudado

### 3.2.1 Características do Alto-Forno

Foram adotadas as características construtivas e alguns parâmetros de processo do mini alto-forno a carvão vegetal que opera na Saint-Gobain de Barra Mansa-RJ, mostrados na tabela 3.6.

**Tabela 3.6** Dados dimensionais/operacionais do mini alto-forno

<b>Dados Dimensionais</b>	
Volume interno útil (m <sup>3</sup> )	192
Número de ventaneiras	11
<b>Dados Operacionais</b>	
Pressão de topo (kg/cm <sup>2</sup> )	2,5
Volume de Sopro (Nm <sup>3</sup> /min)	400
Temperatura de Sopro (°C)	900

### 3.2.2 Características da Matéria-Prima

As características do redutor granulado e a composição química da carga metálica, cujos valores foram inseridos na entrada de dados do programa, constam nas tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente.

**Tabela 3.7** Características do redutor granulado <sup>(3)</sup>

Componente		% em massa	
		Coque	Carvão Vegetal
C fixo		89,7	73,39
Voláteis		-	24,9
H <sub>2</sub> O		2,12	0,4
Cinza	CaO	0,01	0,0068
	SiO <sub>2</sub>	0,0425	0,0044
	MgO	0,001	0,00098
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0265	0,00029
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,00049
	Outros	-	0,0001
Poder Calorífico (Kcal/Kg)		7755	7365

**Tabela 3.8** Composição química da carga metálica <sup>(5)</sup>

Componente	Carga Metálica	
	Sínter	Aglomerados auto-redutores
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	0,25028	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,5923	0,136
<b>FeO</b>	-	0,283
<b>Fe</b>	-	0,173
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,0431	0,043
<b>CaO</b>	0,082	0,046
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,0127	0,022
<b>MgO</b>	0,0167	0,011
<b>MnO</b>	0,002	0,008
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	0,001
<b>ZnO</b>	-	0,005
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,0002	-
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	0,001
<b>C</b>	-	0,271
<b>Ganga</b>	0,001	-

Iguais características foram adotadas para os finos injetados pelas ventaneiras.

A composição adotada para os aglomerados auto-redutores, é típica de aglomerados fabricados, a partir de resíduos dos processos siderúrgicos.

### 3.3 Casos Estudados

Como o principal objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos do processo utilizando coque ou carvão vegetal como redutor, são adotados diferentes modos de operação, aplicando-as tanto para mini alto-forno a coque como para mini alto-forno a carvão vegetal. A partir de um caso base, com a carga metálica composta de 100% de sinter e sem injeção de finos, os demais casos adotam injeção de finos (coque ou carvão vegetal, dependendo do redutor adotado) e/ou substituição de parte do sinter por aglomerados auto-redutores.

No modo de operação chamado caso base, toma-se o teor de Si no gusa e a basicidade da escória como referência.

A formação dos casos estudados pode ser visualizada na tabela 3.9.

**Tabela 3.9** Formação dos casos estudados

	<b>Sinter (%)</b>	<b>Aglomerado auto-redutor (%)</b>	<b>Injeção de Finos (kg/t)</b>
<b>Caso Base</b>	100	-	-
<b>Caso 1</b>	80	20	-
<b>Caso 2</b>	100	-	100
<b>Caso 3</b>	95	5	100
<b>Caso 4</b>	80	20	100

## 4 RESULTADOS

A siderurgia tem sofrido pressões no sentido de aumentar sua eficiência energética e reduzir o impacto ambiental. Uma das alternativas em voga é o desenvolvimento de processos de alta produtividade, baixo consumo energético e com grande flexibilidade na utilização de matérias-primas com baixo ponto de amolecimento e fusão. Neste contexto, o mini alto-forno apresenta-se como um processo muito competitivo com respeito a altas produtividades e flexibilidade de matérias-primas possibilitando-se trabalhar com carga que possa experimentar baixo tempo de residência na região de redução no estado sólido. A combinação com a utilização de carga auto-redutora permite a substituição de combustível sólido com baixos tempos de residência na zona granular, o que possibilita incrementos consideráveis na marcha do forno e menor degradação da mesma.

A tabela 4.1 mostra os principais parâmetros operacionais e de qualidade do gusa, obtidos para cada um dos casos estudados carregando coque e carregando carvão vegetal:

- i) *caso base* - sem injeção de PCI e sem carga auto-redutora;
- ii) *caso 1* - sem injeção de PCI e 20% de carga auto-redutora;
- iii) *caso 2* - 100kg/ton gusa de PCI e sem carga auto-redutora;
- iv) *caso 3* - 100kg/ton gusa de PCI e 5% de carga auto-redutora;
- v) *caso 4* - 100kg/ton gusa de PCI e 20% de carga auto-redutora.

Vale lembrar que estas quantidades são implementadas na entrada de dados do programa e sofrem pequenas alterações por questões de balanço de massa, no decorrer das iterações.

**Tabela 4.1** Principais parâmetros operacionais para o mini alto-forno

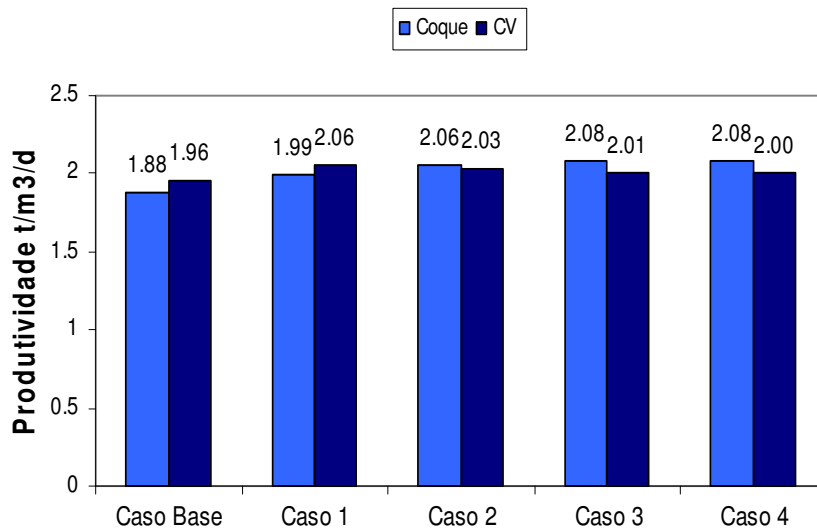
	Mini alto-forno a coque					Mini alto-forno a carvão vegetal				
	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4

PCI[kg/t]	-	-	99,1	99,1	99,1	-	-	98,95	99,02	99,3
Aglomerado auto-redutor [kg/t]	-	334,2	-	81,7	334,7	-	329,3	-	80,6	330,9
Redutor granulado [kg/t]	571,3	483,9	475,7	449,1	375,1	702,3	582,6	585,9	568,9	490,6
Sinter [kg/t]	1602,9	1322,9	1601,8	1534,3	1324,5	1575,8	1303,2	1580,5	1513,9	1307,8
Fuel rate [kg/t]	572,4	574,8	574,9	570,4	565,2	702,3	672,1	684,9	689,9	679,6
Carbon rate[kg/t]	504,0	517,7	491,0	489,7	493,2	515,4	517,1	501,2	510,8	521,3
Produtividade [t/m <sup>3</sup> /dia]	1,88	1,99	2,06	2,08	2,08	1,96	2,06	2,03	2,01	2,00
Oxigenio [%]	3,95	5,37	4,60	5,04	6,02	3,73	5,91	4,71	5,26	6,24
Produção [t/dia]	361,7	382,5	396,2	399,6	400,5	377,4	396,6	391,5	387,7	384,4
Si	0,84	0,64	0,76	0,67	0,43	2,14	1,83	1,85	1,81	1,52
Volume escoria [kg/t]	279,3	298,4	303,1	303,2	303,4	222,2	225,9	238,6	238,1	244,3
Basicidade[-]	0,67	0,67	0,67	0,69	0,75	0,82	0,76	0,88	0,869	0,810
Sopro [Nm <sup>3</sup> /t]	1386,5	1386,4	1338,7	1327,1	1324,1	1405,1	1337,2	1354,5	1367,9	1379,5
Gas de topo [Nm <sup>3</sup> /t]	1949,7	1946,6	1937,9	1919	1904,7	2206,6	2084,4	2152,5	2165,5	2151,0
$\frac{CO_2}{CO_2 + CO}$	0,489	0,449	0,475	0,495	0,47	0,252	0,27	0,283	0,295	0,289
Perda de carga [atm]	0,51	1,00	0,57	0,784	1,198	0,886	1,116	0,941	1,03	1,249
Volume útil [m <sup>3</sup> ]	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192

Nota-se que alguns dos resultados obtidos são diferentes do que se obtém na prática, o que se explica pelo fato de que os casos estudados foram ajustados de forma a se obter um modo de operação com coque compatível com o modo de operação com carvão vegetal, já que o objetivo é operar os dois modos no mesmo reator.



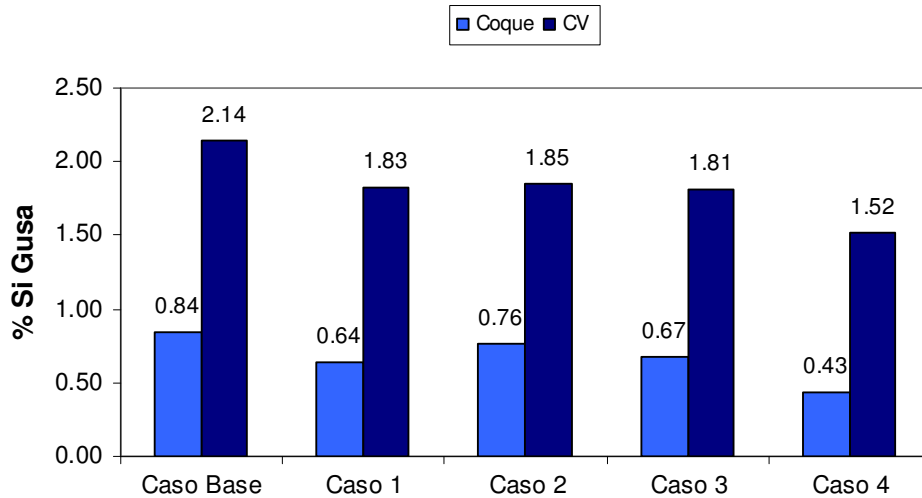
As figuras 4.1 até 4.6 possibilitam uma melhor visualização do que ocorre em relação à produtividade, percentual de silício no gusa, consumo de sínter e redutor granulado (coque ou carvão vegetal), volume e basicidade da escória.



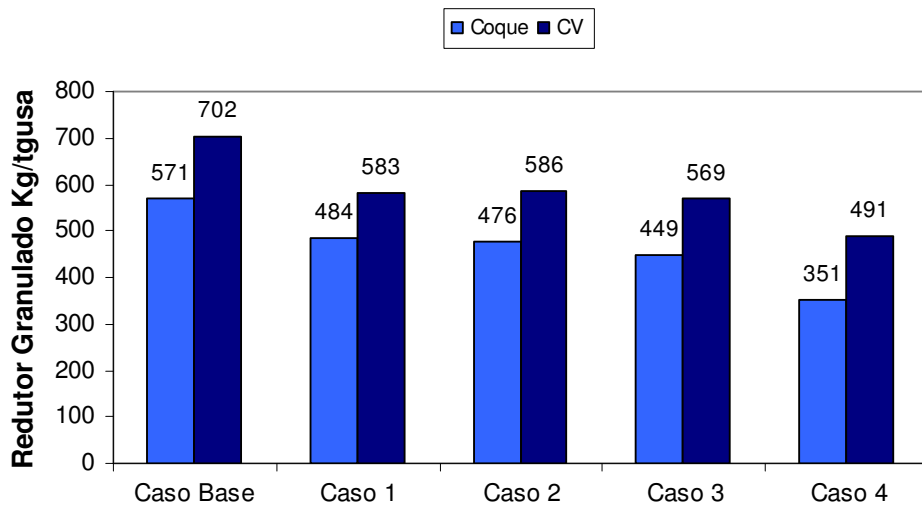
**Figura 4.1** - Parâmetros globais - Produtividade

Analisando a figura 4.1 observa-se um acréscimo irrelevante da produtividade conforme aumenta-se a percentagem de aglomerados na carga, o acréscimo é pouco maior quando se combina a injeção de carvão pulverizado. Estes resultados foram almejados, pois em um primeiro momento não se deseja alterar significativamente as condições internas do reator devido a detalhes construtivos de refratários e equipamentos auxiliares, tais como: refrigeração da carcaça e capacidade de sopro. Com a injeção de PCI, a produtividade do caso carregado com coque passa a ser levemente maior que no caso carregado com carvão vegetal. Para o carvão vegetal, o volume interno ocupado pelo redutor aumenta e conseqüentemente menor volume de carga que contem ferro, assim, a área específica disponível para as reações de redução no estado sólido diminui. Uma possibilidade seria aumentar o volume de sopro, entretanto, para manter similaridade com o processo a coque, esta alternativa não foi considerada nesta

investigação, pois objetivo primeiro da presente investigação foi buscar condições compatíveis para os dois processos visando ora operar com base em biomassa e ora operar com base de small coque, garantindo alta flexibilidade de utilização do redutor.

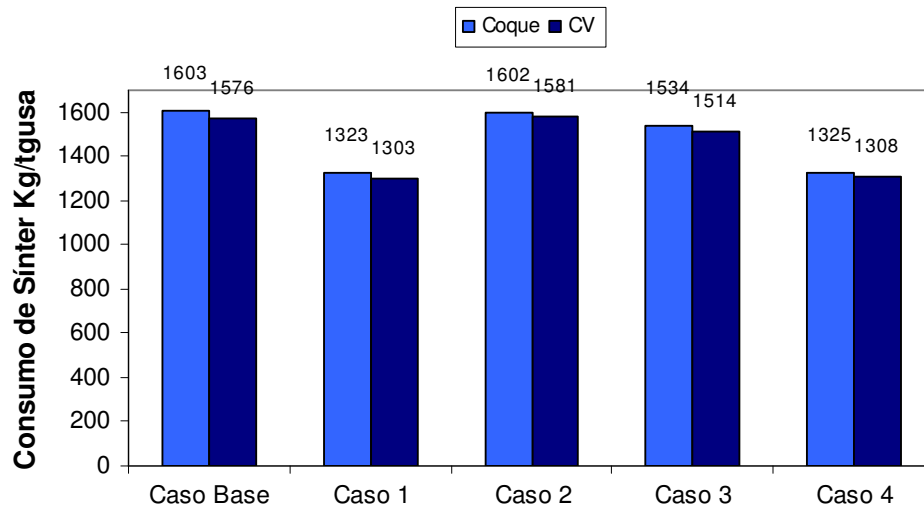


**Figura 4.2** - Parâmetros globais – Percentual de silício no gusa



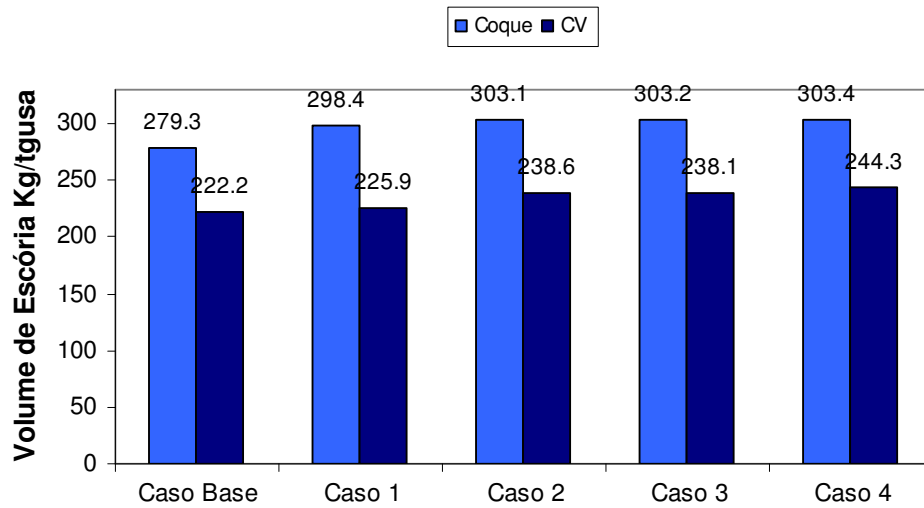
**Figura 4.3** - Parâmetros globais – Consumo de redutor granulado

Com o uso de carga auto-redutora e PCI o consumo específico de redutor granulado, coque ou carvão vegetal, diminui (figura 4.3) devido principalmente à substituição deste elemento pelo carbono no interior do aglomerado auto-redutor nas reações de “solution loss”. Operando com carregamento de coque esta diminuição é mais acentuada, o que se justifica pela quantidade de voláteis presente no carvão vegetal. Os voláteis do carvão vegetal são liberados na zona granular do forno, o que causa uma demanda energética maior nesta região quando comparada ao small coque, entretanto, permite um maior volume de gás redutor nesta região e conseqüentemente maior redução nesta zona.



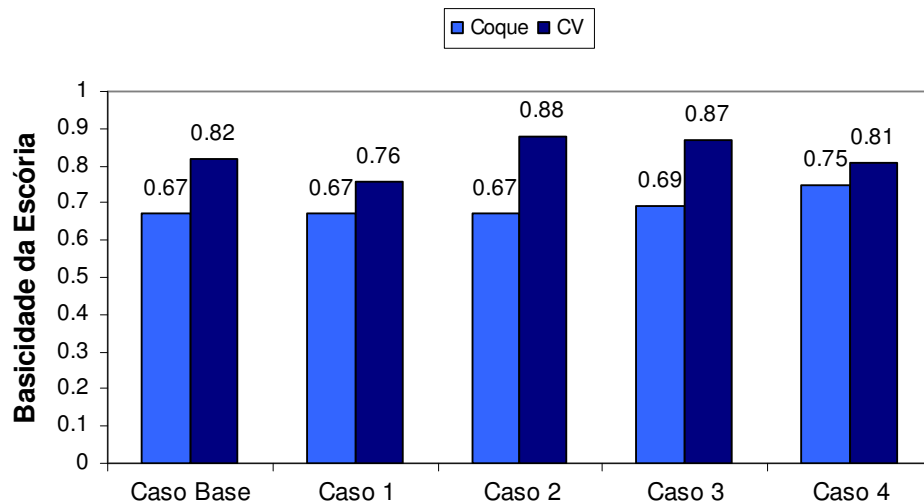
**Figura 4.4 - Parâmetros globais – Consumo de sinter**

Pela análise da figura 4.4 observa-se com a prática de carregamento de aglomerados auto-redutores é possível diminuir o consumo de sinter em 280 kg por tonelada de gusa produzido. Os aglomerados auto-redutores são fabricados a partir de resíduos do próprio processo permitindo a diminuição do passivo ambiental de toda a cadeia produtiva. Por outro lado, o mesmo contém algumas impurezas que devem ser tratadas com cautela.



**Figura 4.5 - Parâmetros globais – Volume de escória**

Como se pode observar a operação com carvão vegetal (figura 4.5) produz um volume de escória por tonelada de gusa bem mais baixo acarretando num menor consumo de energia para fusão da escória e menor impacto ambiental com o resíduo escória, em contrapartida há um aumento substancial do teor de silício no gusa (figura 4.2).



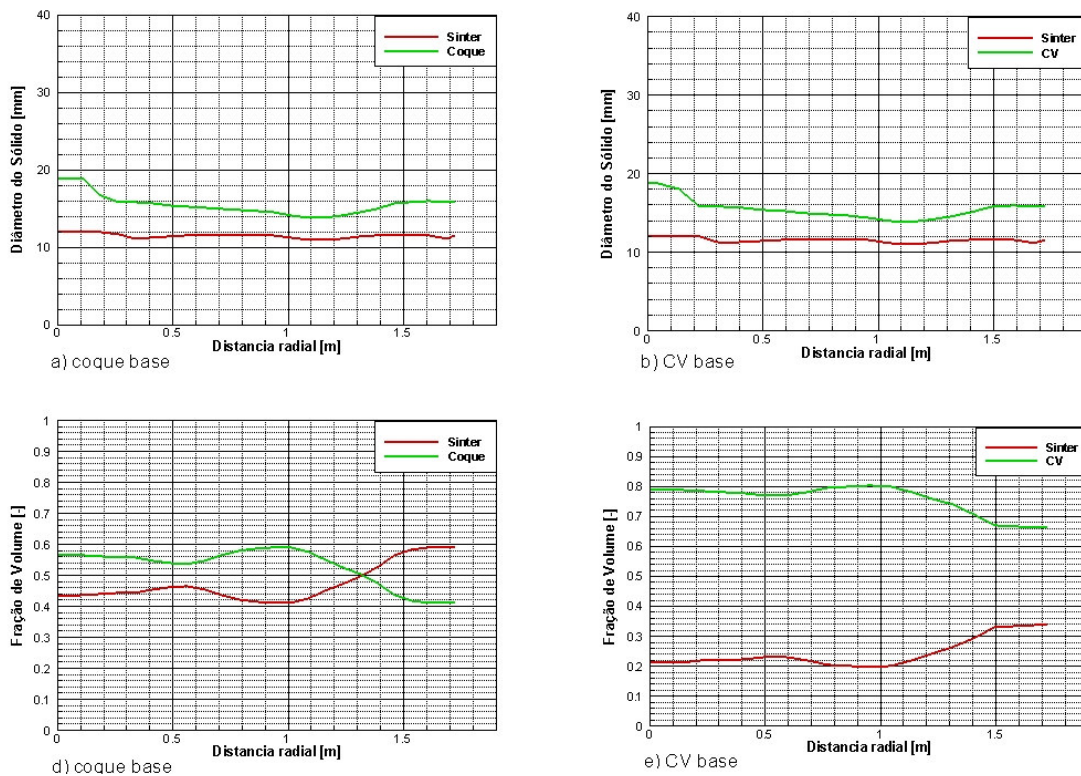
**Figura 4.6 - Parâmetros globais – Basicidade da escória**

No alto-forno a carvão vegetal, o redutor tem um baixo teor de cinzas (básicas), e o carregamento de enxofre é desprezível, o que permite a operação com um baixo volume de escória ácida ( $\text{CaO/SiO}_2 < 1,00$ ). Já no alto-forno a coque, o

elevado teor de cinzas de caráter ácido (altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e o elevado nível de carregamento de enxofre, normalmente opera-se com um alto volume de escória básica ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1,20$ ). Diferentemente neste trabalho, para possibilitar o carregamento de coque e carvão no mesmo forno, sem comprometer a vida útil do revestimento refratário, optou-se por manter nos dois casos, escória ácida, através da adição de quartizito na carga, quando operando com coque. A figura 4.6 mostra os resultados obtidos.

#### **4.1 COMPARAÇÃO DO MINI ALTO-FORNO A COQUE E CARVÃO VEGETAL**

Um dos objetivos do presente trabalho consiste em determinar condições operacionais equivalentes do mini alto-forno a coque e carvão vegetal para estabelecer uma base para a conversão de modos operacionais sem maiores transtornos em termos de refratários, sistema de carregamento, refrigeração e sopro. Visando obter esta flexibilidade de modos operacionais, determinou-se um caso base para o coque e outro para o carvão vegetal com características similares em termos de condições internas e globais. A seguir apresentam-se os resultados comparativos para os principais variáveis do processo.

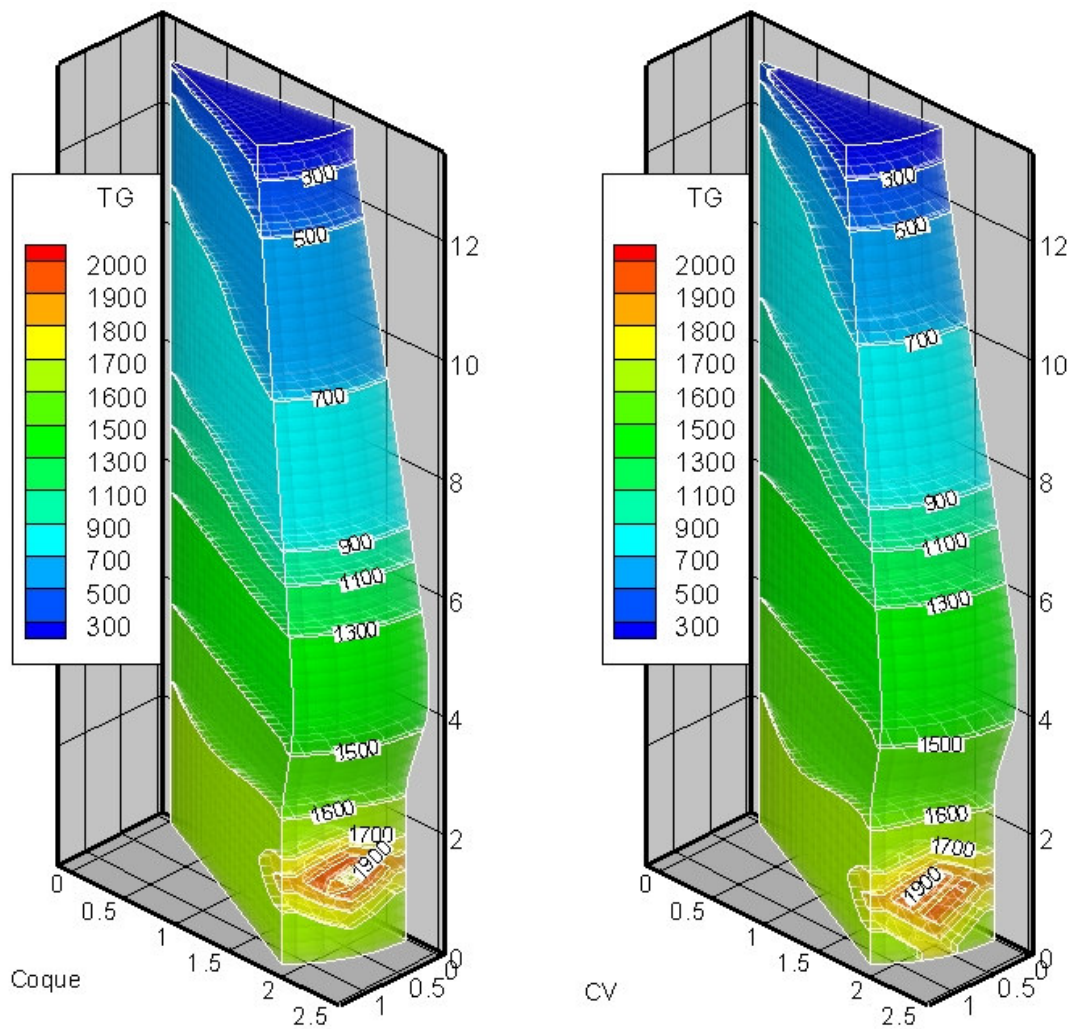


**Figura 4.7** - Diâmetro do sólido e distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a coque e a carvão vegetal

A distribuição da carga consiste em se obter uma distribuição radial de tamanho de partícula na carga, adequada ao escoamento gasoso desejado. Para isso aproveita-se a grande diferença de permeabilidade existente entre as camadas de carga metálica e as de combustível sólido, para se obterem variações na relação entre as espessuras das respectivas camadas. Desse modo, as regiões onde a camada de combustível é mais espessa que a camada de carga metálica tendem a ser mais permeáveis ao fluxo gasoso das regiões onde ocorre o inverso. Dentro das próprias camadas, regiões onde se concentram partículas de maior tamanho, também, tendem a ser mais permeáveis.

A distribuição da carga tem importância fundamental para a operação do forno, uma vez que ela é um dos fatores determinantes da eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente o formato e posição da zona coesiva e da carga térmica sobre a parede do forno.

A distribuição do tamanho das partículas para o mini alto-forno a coque e o mini alto-forno a carvão vegetal são apresentadas, respectivamente nas figuras 4.7a e 4.7b, enquanto que a distribuição de carga para o coque é mostrada na figura 4.7d e para o carvão vegetal na figura 4.7e. Foi adotado, para o carregamento com carvão vegetal, uma espessura da camada deste redutor maior, na região central do forno, afim de permitir uma maior permeabilidade.



**Figura 4.8** - Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal

O ar quente injetado na parte inferior do forno, através das ventaneiras, promove a combustão do coque/carvão vegetal, gerando uma grande quantidade de calor e volume de gases. Os gases, produto desta combustão, arrastando este calor, fluem para o topo do forno através dos vazios existentes entre as partículas e transferem o calor gerado para a carga, que desce em contracorrente.

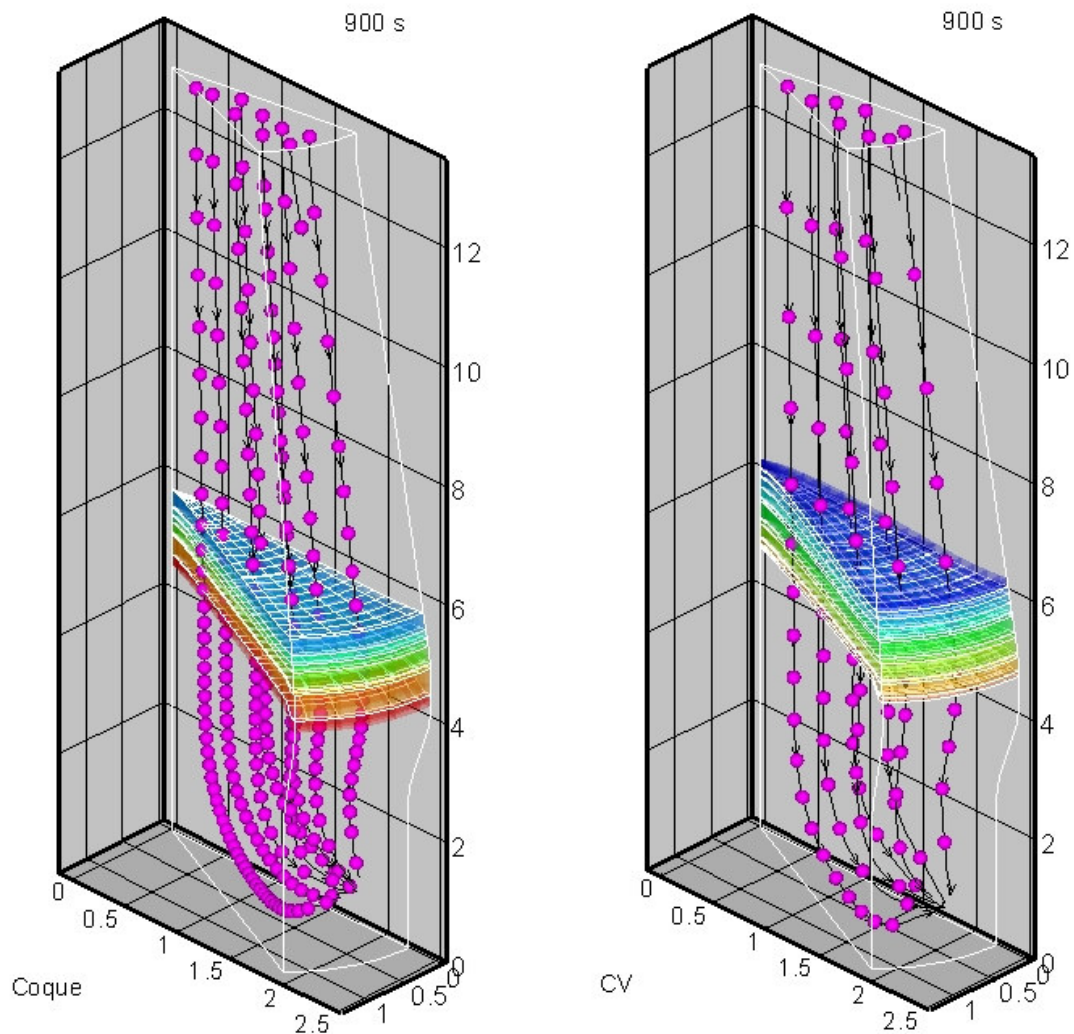
A carga fria carregada no topo, à medida que desce para as regiões inferiores do mini alto-forno, vai sendo aquecida pela corrente de gases que, partindo da região das ventaneiras a cerca de 1900°C, transfere seu calor para a carga a medida que esta vai subindo, chegando no topo a uma temperatura média entre 100° e 300°C.

Há que se considerar que o grande volume de gases gerado na região das ventaneiras não flui para o topo de uma maneira uniforme, em relação a seção horizontal da carga. Existe a formação de caminhos preferenciais, onde haverá maiores temperaturas que em outros pontos da mesma seção horizontal, pois ali está havendo um maior aporte de calor devido à passagem de maiores volumes de gases quentes.

A figura 4.8 mostra a distribuição da temperatura do gás no interior do mini alto-forno. Percebe-se que na região central do topo do forno o carregamento com carvão vegetal experimenta temperaturas mais elevadas, o que se explica pelo fato de que adotou-se uma camada de carvão mais espessa na região central, como foi visto na figura 4.7e.

A maior temperatura da zona de reserva térmica do alto-forno a coque implica em um maior tempo necessário para a carga atingir esta temperatura, em relação ao alto-forno a carvão vegetal. Com isto, a maior parte das reações de redução ocorrem antes que a carga atinja tal temperatura, o que eleva o rendimento do processo. Portanto essa menor reatividade do coque explica seu menor consumo de carbono.

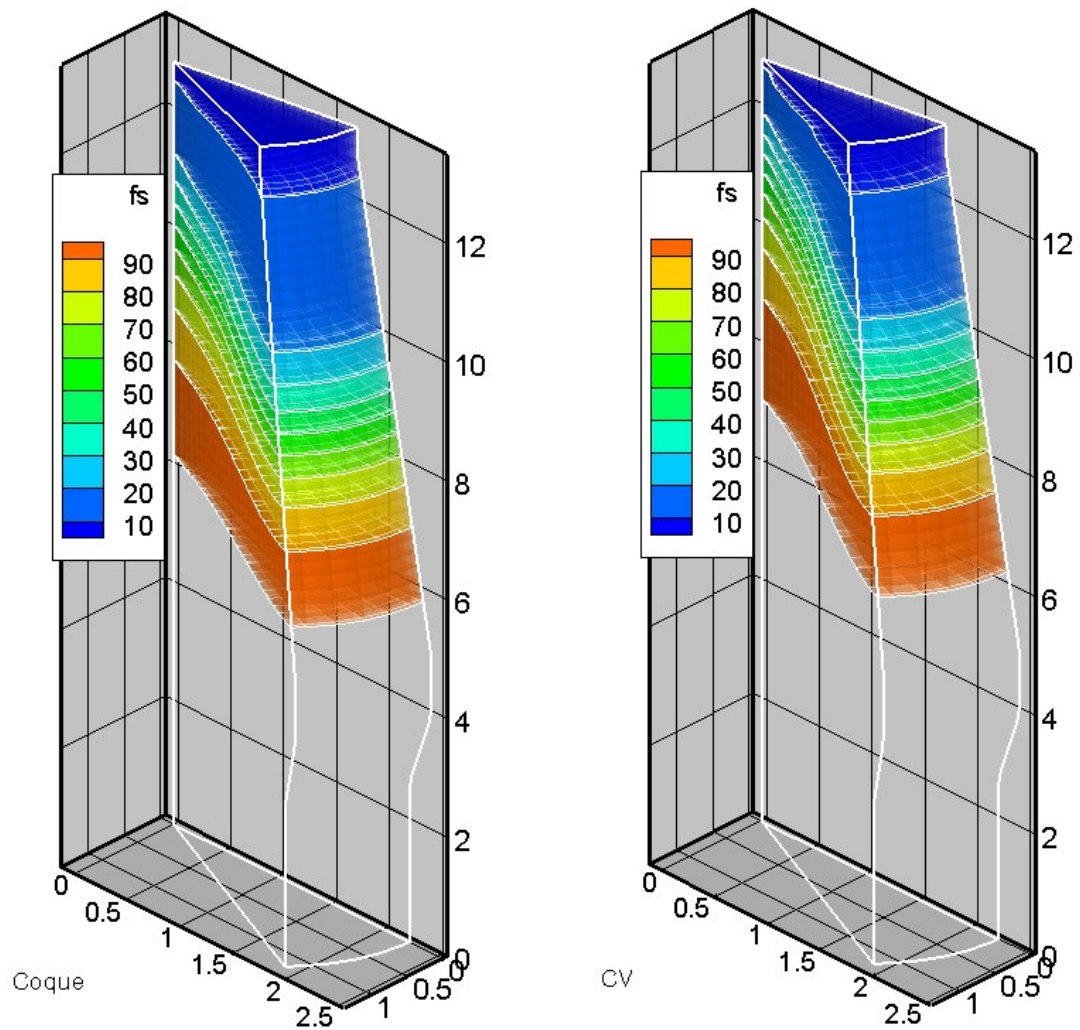




**Figura 4.9** - Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal

A zona coesiva é constituída de camadas formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo de gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de coque/carvão vegetal. Na zona coesiva a carga metálica passa sucessivamente do estado sólido, para pastoso, semifundido e finalmente goteja através das partículas de combustível. As gotas de metal e escória passam através do combustível(que não se funde) para se acumularem no cadinho. O gás ascendente tende a passar somente pelas janelas de coque/carvão vegetal.

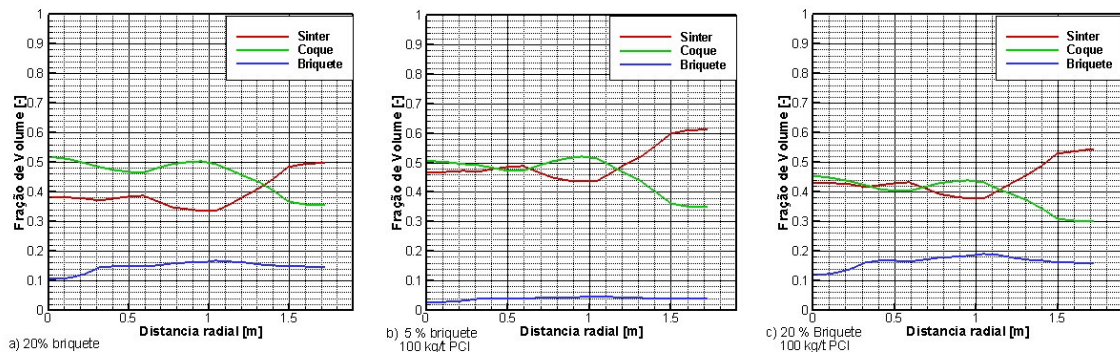
Pela análise da figura 4.9 percebe-se que no carregamento com carvão vegetal a zona coesiva é mais espessa, apesar de manter o mesmo formato que no carregamento com coque. Já o escoamento do sólido ocorre mais rapidamente no caso do carvão vegetal, devido a menor densidade do mesmo. Vale ressaltar também, que as propriedades térmicas do coque e carvão vegetal são bastante diferentes, o que impacta na elevação da temperatura do sólido para os dois processos.



**Figura 4.10** - Fração de redução da carga no mini alto-forno a coque e a carvão vegetal

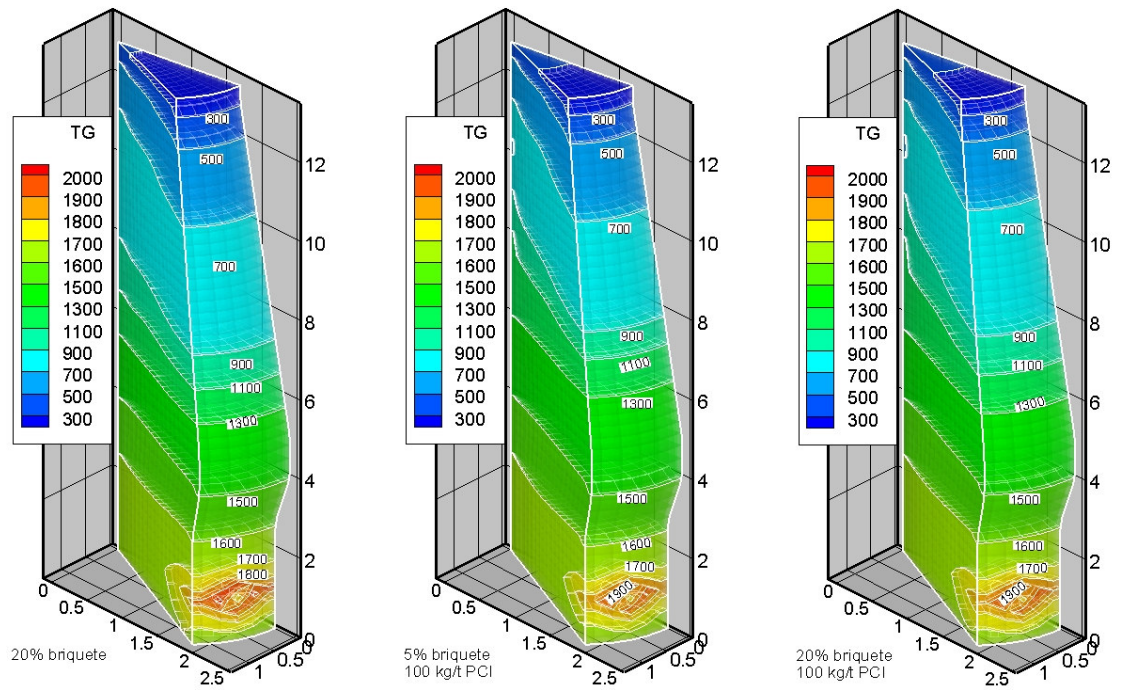
No alto-forno a coque, a carga metálica ocupa maior volume do forno que no alto-forno a carvão vegetal. Assim, para um mesmo ritmo de produção, no alto-forno a carvão vegetal, o tempo de residência da carga é menor que no caso do coque. Com isto, no alto-forno a coque a carga permanece por um maior tempo na zona de preparação, favorecendo um menor consumo de carbono.

## 4.2 Utilização de carga auto-redutora no mini alto-forno a coque



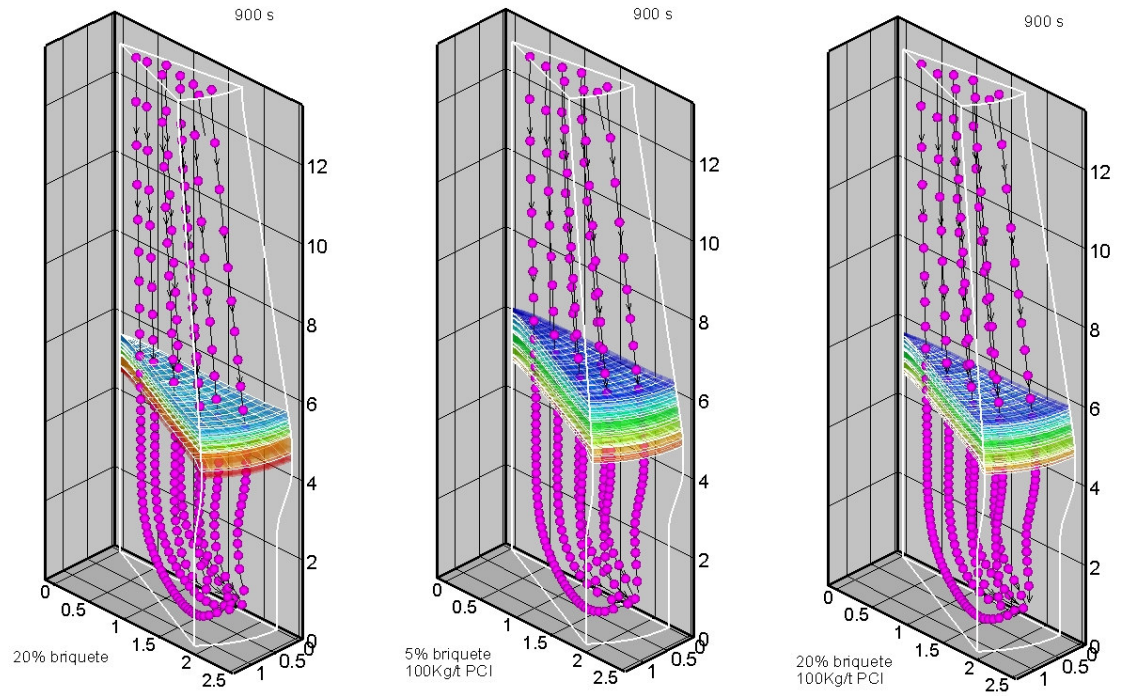
**Figura 4.11** - Distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora

Na distribuição da carga mostrada na figura 4.11, com combinação de injeção de PCI, as camadas de coque e centre podem ser mantidas com espessura de PCI, aliadas a finas camadas de briquete.



**Figura 4.12** Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora

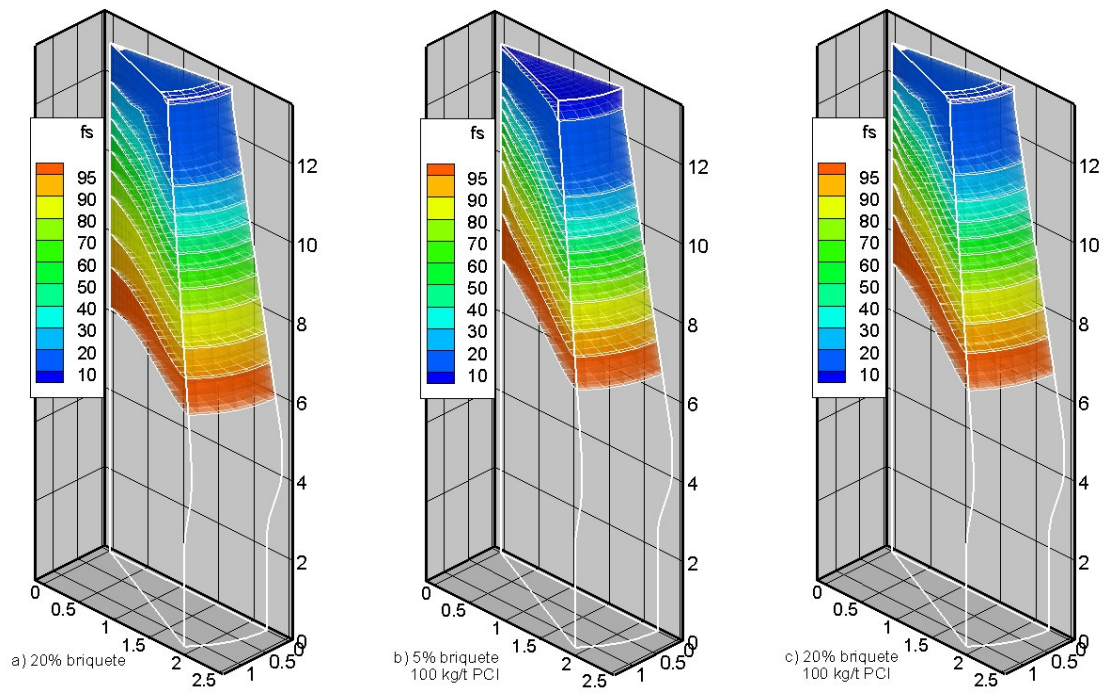
A figura 4.12 mostra a distribuição de temperatura da fase gasosa para os três casos que utilizam carga auto-redutora, observa-se que no caso em que se adota carregamento de 20% de aglomerado auto-redutor combinado com 100kg/ton de gusa de injeção de PCI o gás atinge temperaturas mais altas mais rapidamente.



**Figura 4.13** - Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora

Na figura 4.13 é plotado, simultaneamente, o perfil da zona coesiva e o escoamento do sólido. Observa-se que nos casos em que se carrega maior quantidade de briquetes a zona coesiva é menos espessa.

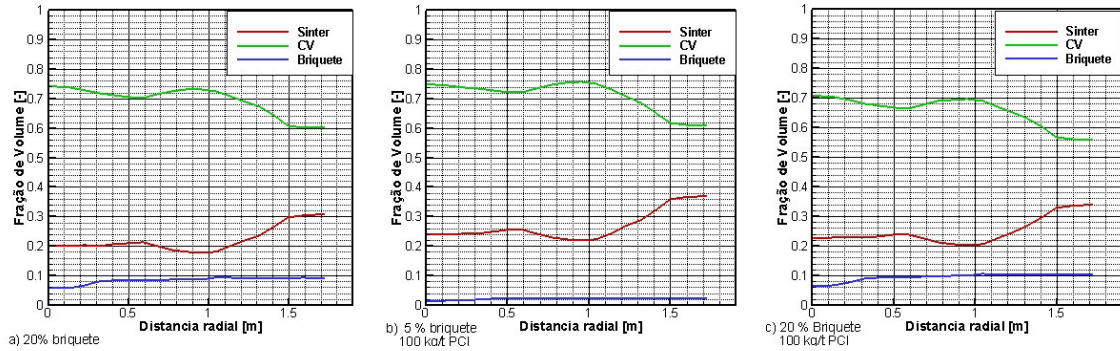




**Figura 4.14** - Fração de redução da carga no mini alto-forno a coque, utilizando carga auto-redutora

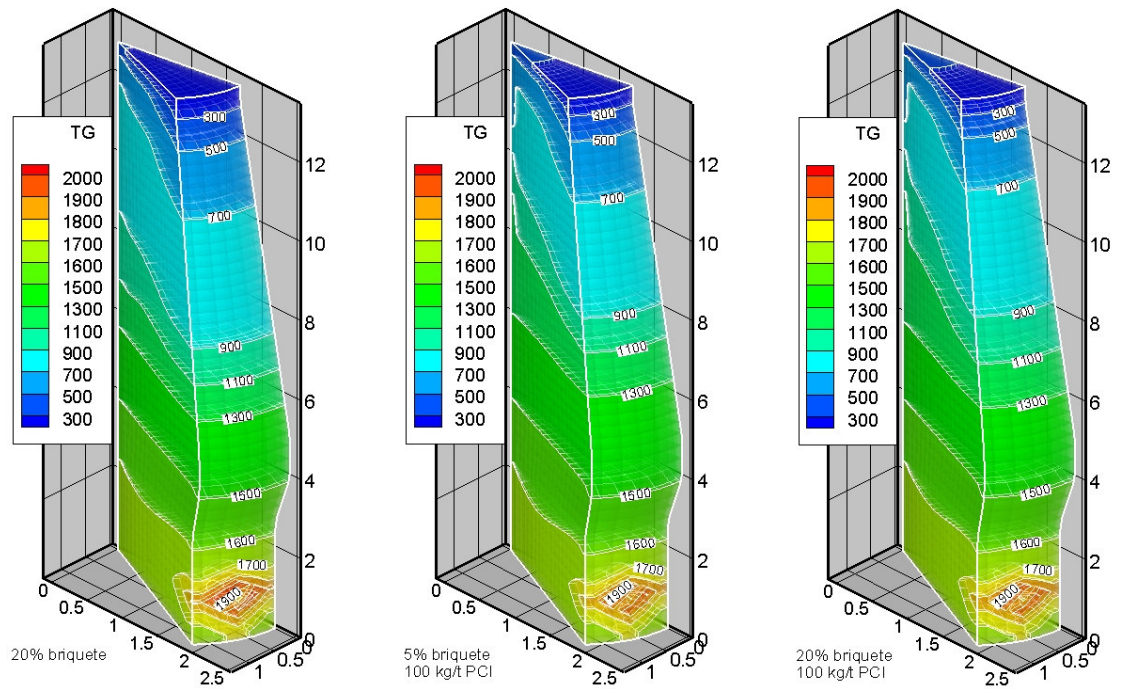
Observa-se na figura 4.14 que quando se aplica a prática de injeção de PCI, a carga metálica é reduzida mais rapidamente.

### 4.3 Utilização de carga auto-redutora no mini alto-forno a carvão vegetal



**Figura 4.15** - Distribuição da carga ao longo da direção radial no topo do mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora

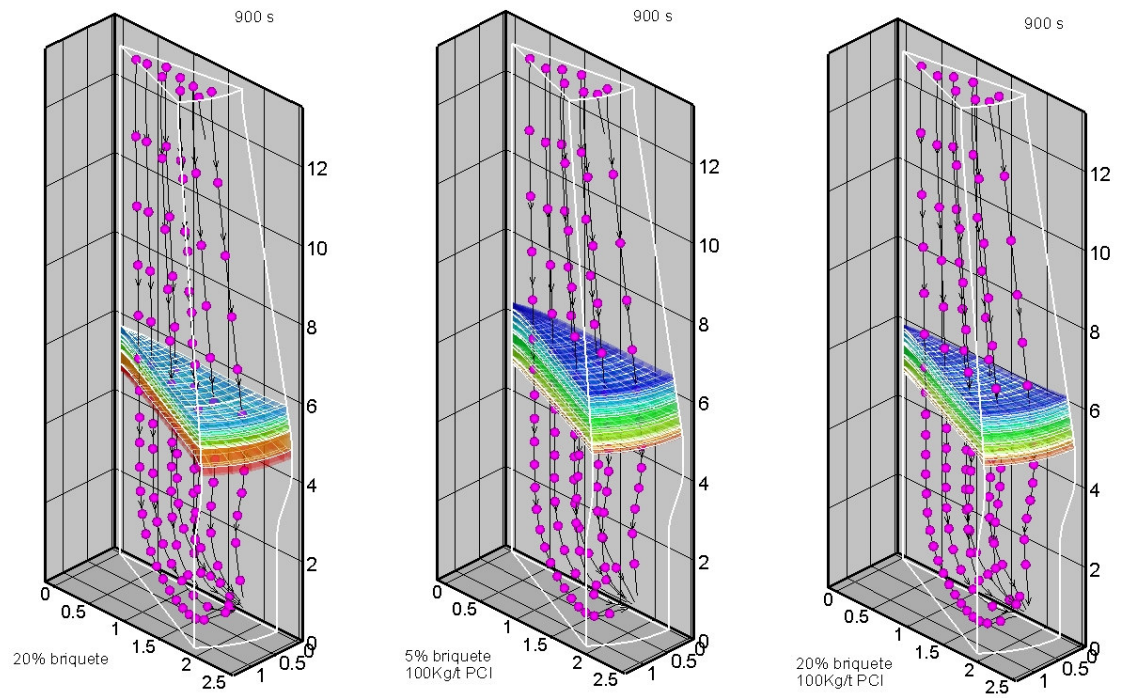
Como se pode observar na figura 4.15, igualmente ao adotado para o caso base do carregamento com carvão vegetal, uma espessura da camada deste redutor é maior, na região central do forno, para possibilitar uma maior permeabilidade.



**Figura 4.16** Distribuição de temperaturas para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora

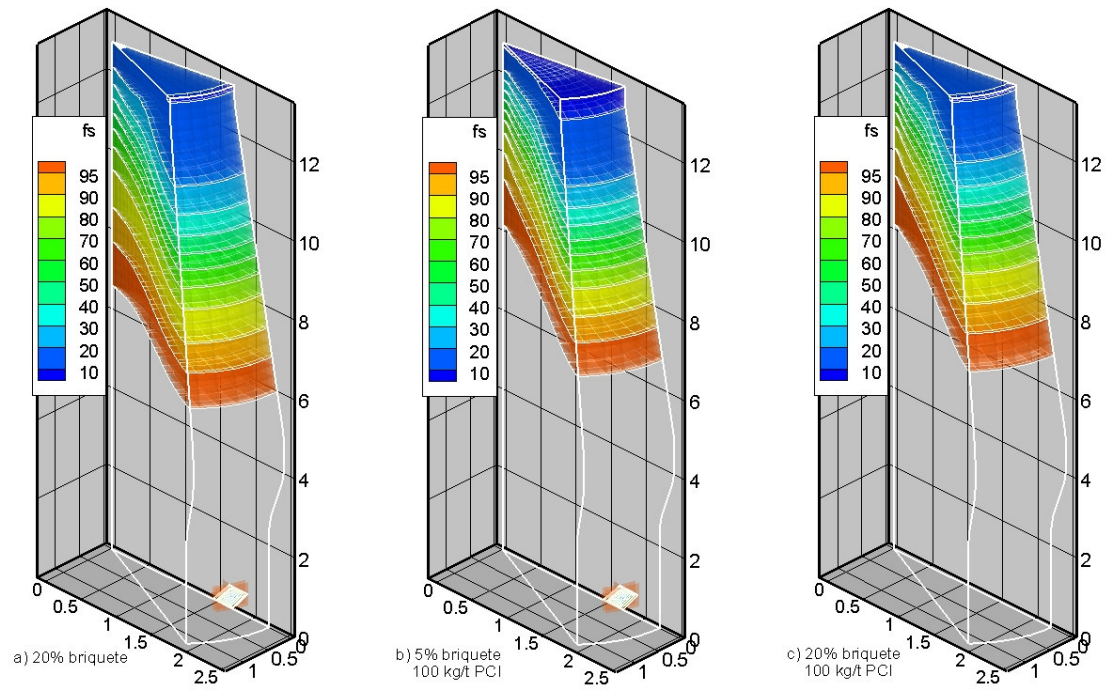
A figura 4.16, mostra a distribuição de temperatura do gás para os casos que utilizam carga auto-redutora, é possível observar que com a injeção de PCI, num determinado nível, na região central do topo a temperatura é bem mais baixa que no caso que utiliza apenas briquetes.



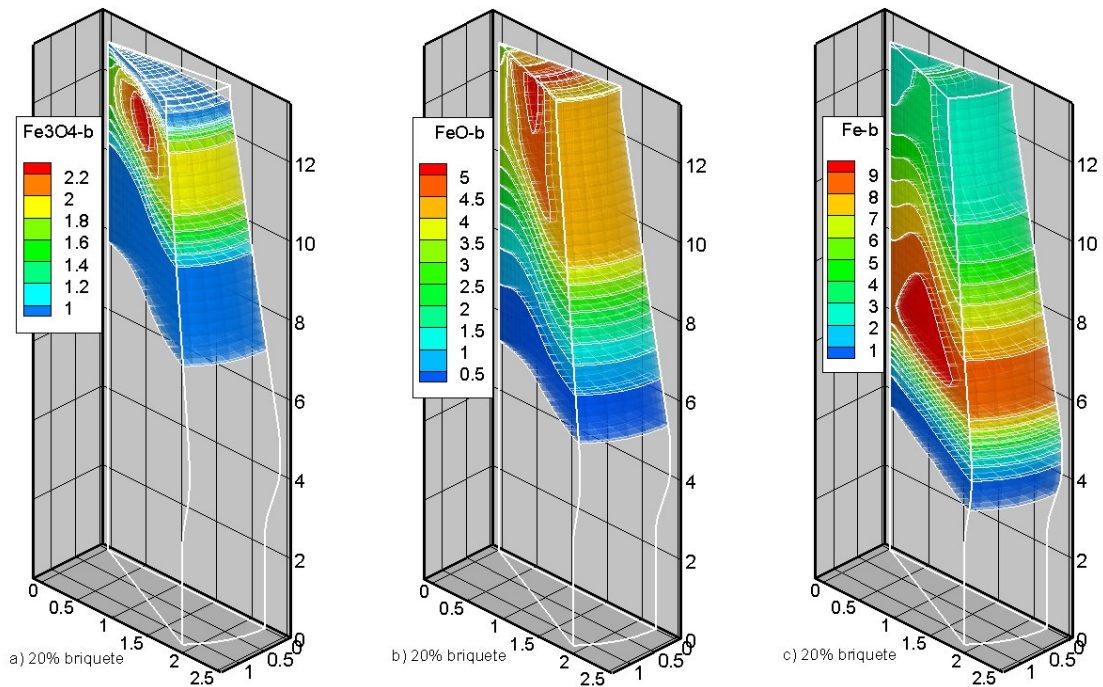


**Figura 4.17** - Zona coesiva e escoamento do sólido para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora

Da mesma forma que para o carregamento com coque, a figura 4.17 mostra que quando se carrega mais aglomerados auto-redutores a zona coesiva é menos espessa.



**Figura 4.18** - Fração de redução da carga no mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora



**Figura 4.19** - Fração de redução da carga no mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora

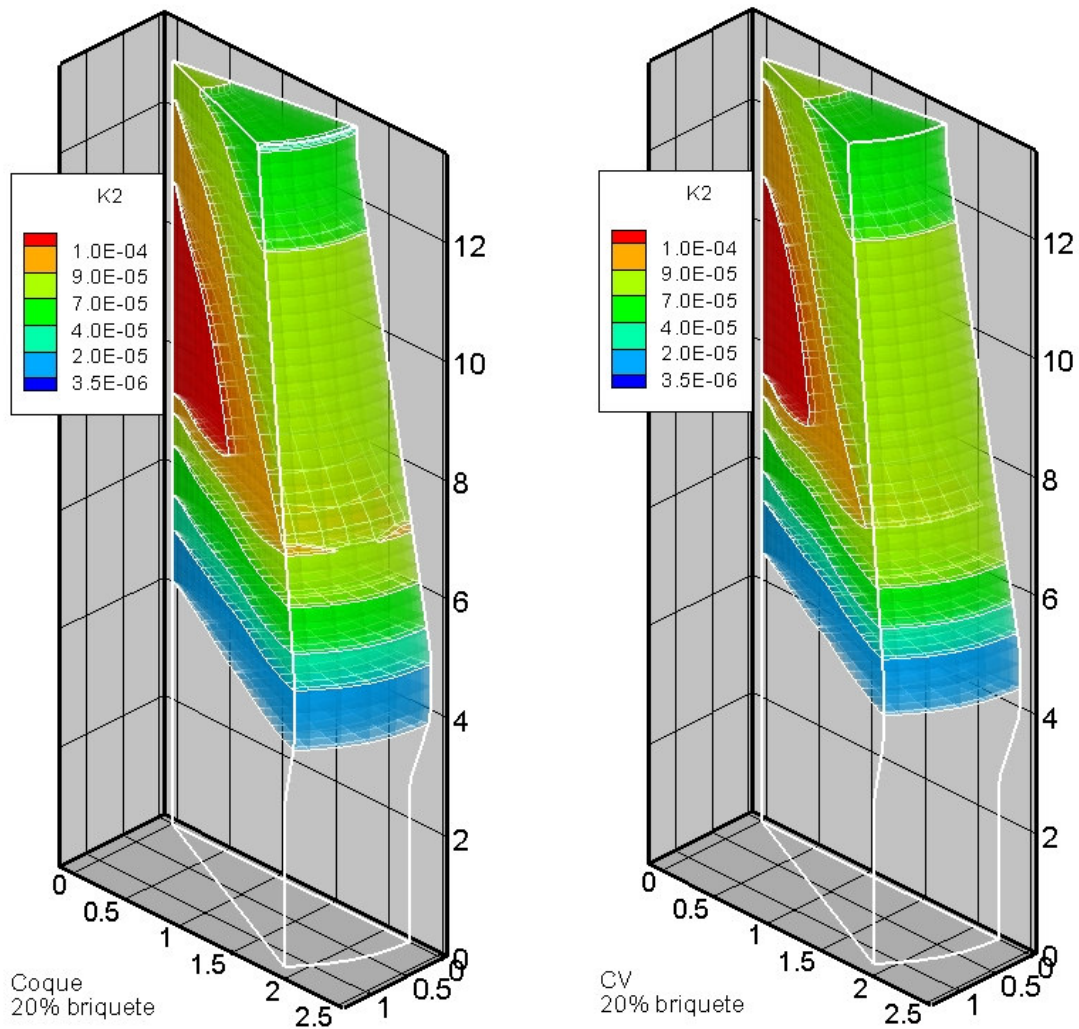
Na figura 4.19 plota-se a evolução da redução dos óxidos de ferro para o caso no qual se utiliza 20% de carga auto-redutora, sem combinação com injeção de PCI.

#### 4.4 Comportamento dos álcalis e zinco no mini alto-forno com aglomerado auto-redutor

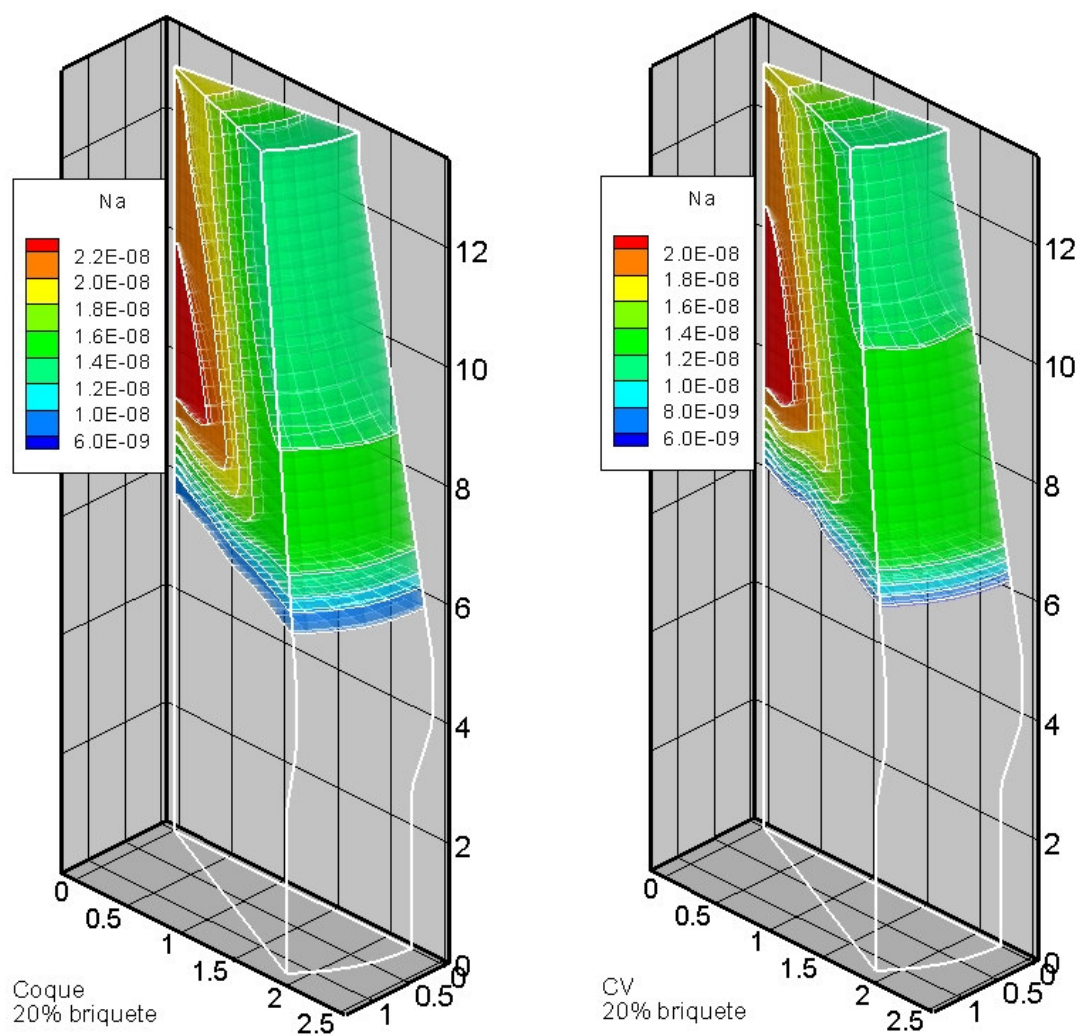
Os álcalis e o zinco são compostos indesejáveis no processo do alto-forno, uma vez que podem ser responsáveis pela formação de cascões. Uma vez carregados no mini alto-forno, parte dos mesmos fica recirculando no interior do reator, em ciclos de evaporação/condensação.

A eliminação destes elementos é fortemente influenciada pela basicidade da escória: quanto menor a basicidade, maior a taxa de eliminação. Analisando as figuras 4.20 a 4.23 percebe-se pouca variação entre as quantidades recirculantes de

álcalis no mini alto-forno a carvão-vegetal e o no mini alto-forno a coque, devido pouca variação entre as basicidades dos dois casos. Os valores obtidos para os dois casos são resultados do carregamento de briquetes auto-redutores produzidos através de finos de pó da siderurgia(pó de alto-forno, sinterização e lamas de aciaria). Para a distribuição do sódio, observa-se pequena elevação para o caso do carvão vegetal devido ao abaixamento da temperatura da zona de gotejamento do mini alto-forno.

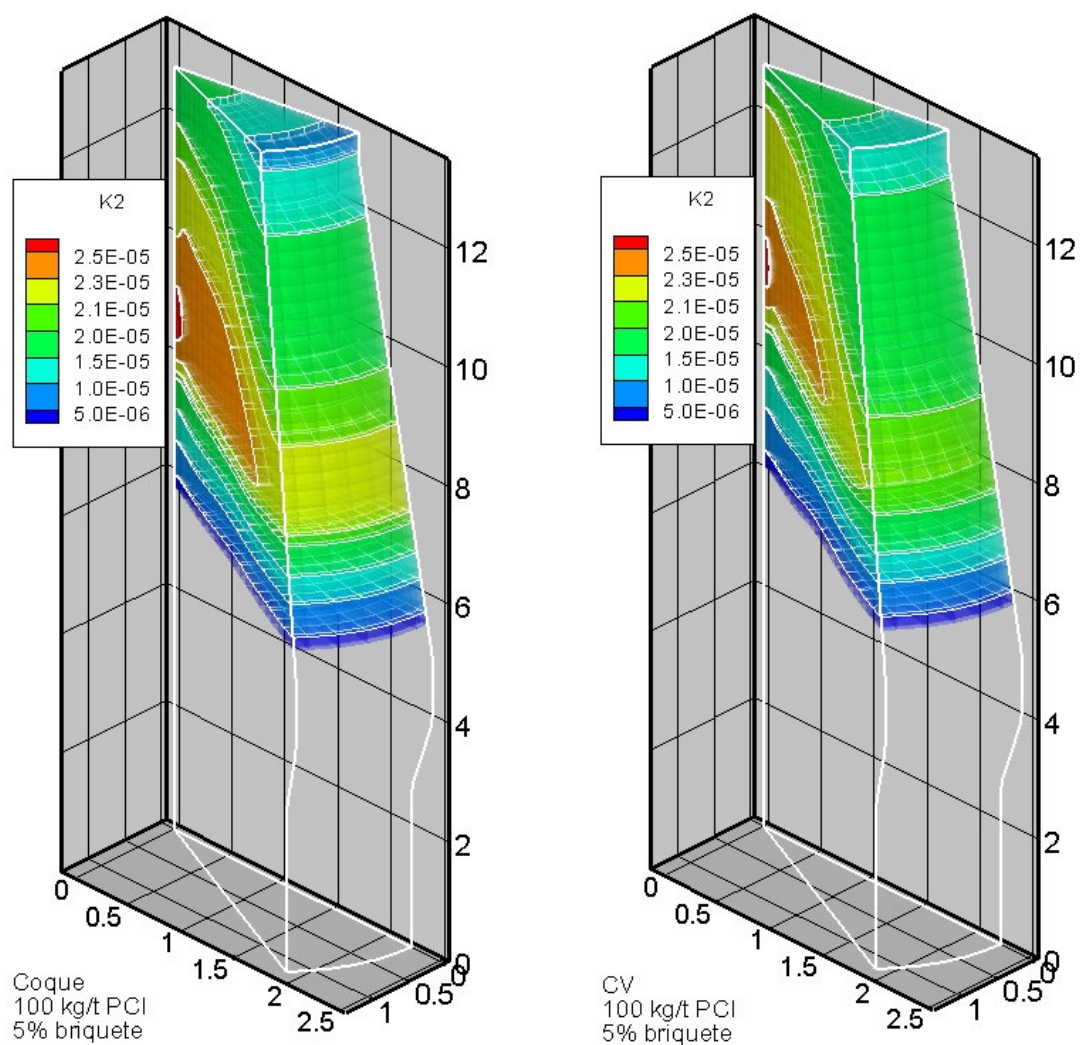


**Figura 4.20** - Distribuição do potássio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora



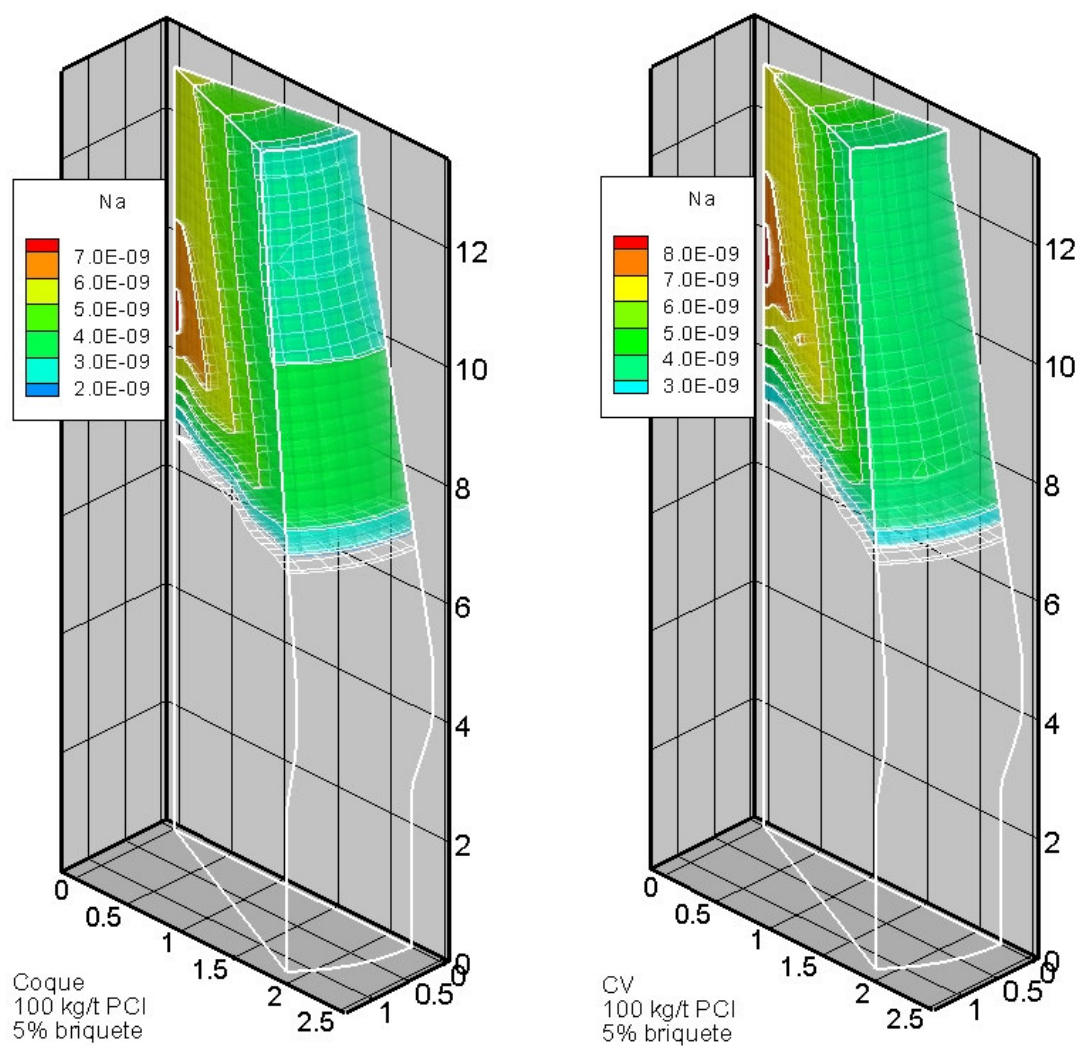
**Figura 4.21** - Distribuição do sódio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora





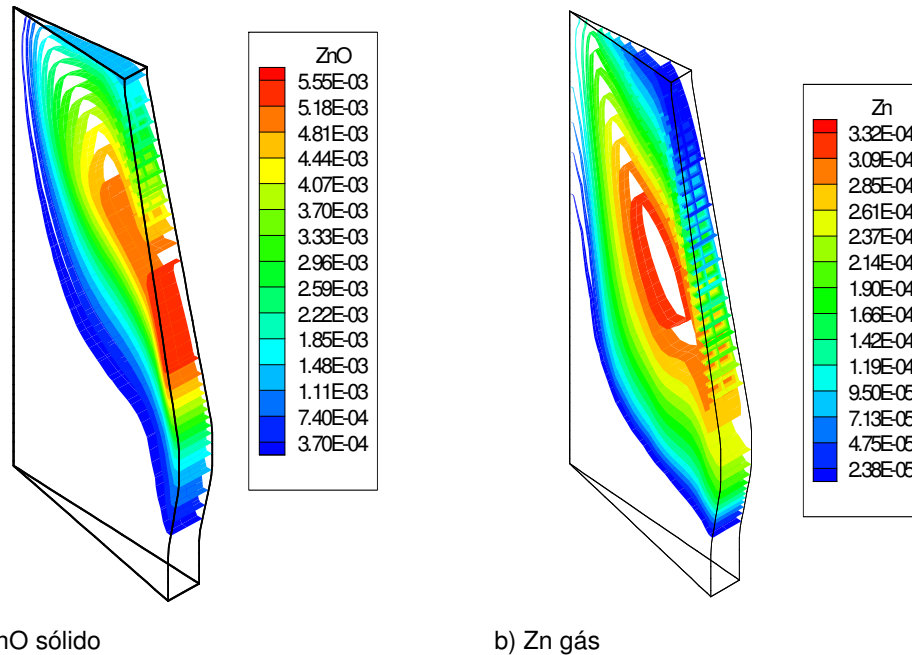
**Figura 4.22** - Distribuição do potássio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora e injeção de carvão pulverizado

Comparando-se o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal com injeção de PCI, observa-se que o sódio e o potássio diminuem, tal efeito benéfico se dá devido ao maior volume de gás escoando no interior do alto-forno, possibilitando um aumento na concentração destes elementos no gás de topo e conseqüentemente menor concentração na região de recirculação.



**Figura 4.23** - Distribuição do sódio para o mini alto-forno a coque e a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora e injeção de carvão pulverizado

#### 4.4.1 Comportamento do zinco no mini alto-forno carregado com 30% de aglomerado auto-redutor



**Figura 4.24** - Distribuição do zinco para o mini alto-forno a carvão vegetal, utilizando carga auto-redutora.

Observa-se pelos valores máximos e mínimos da fração mássica do zinco, nas fases sólido e gás, que é possível obter a conformação do que foi discutido anteriormente, de que este elemento forma um ciclo dentro do forno.



## 5 CONCLUSÕES

Através do modelo foi possível comparar o comportamento de um alto-forno quando carregado com combustíveis distintos, coque ou carvão vegetal, prever a influência do carregamento de aglomerados auto-redutores e injeção de PCI, combinados ou não e em quantidades diferentes. Pela análise dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- 1) A tecnologia *Flex Fuel* aplicada a um mini alto-forno é operacionalmente viável, visto que ao comparar os parâmetros operacionais obtidos para cada combustível os valores mantiveram-se em uma faixa aceitável;
- 2) Comparando a performance do mini alto-forno a coque com a do mini alto-forno a carvão vegetal nota-se que não há diferença significativa entre os parâmetros operacionais obtidos para cada prática, conforme almejado neste estudo, visando obter maior flexibilidade quanto ao uso de matérias-primas.
- 3) Tanto para o carregamento com coque quanto para o carregamento com carvão vegetal, a prática do uso de PCI e carregamento de aglomerados auto-redutores mostra-se bastante atrativa, quando se considera a diminuição no consumo de sinter (até 20%) e redutor granulado (até 38% para o coque e 30% para o carvão vegetal) causada pela substituição destes materiais mais nobres por alternativas mais baratas e provenientes de reciclagem, tornando o processo mais limpo e sustentável.

- 4) Do ponto de vista ambiental, o uso de carvão vegetal é mais favorável, já que este é uma fonte renovável de energia. Além disso, gera um volume de escória aproximadamente 20% menor que o carregamento com coque.
  
- 5) A tecnologia *Flex Fuel* pode ser vantajosa para uma indústria integrada que utilize o mini alto-forno como estratégia para suprir as flutuações na demanda de produto e reciclar os rejeitos do(s) alto(s)-forno(s) de porte maior, podendo operar com o combustível que melhor lhe convém, em termos econômicos e qualidade do gusa, no que diz respeito ao teor de sílicio, teores mais altos opera-se como carvão vegetal e teores mais baixos com coque. Nota-se, portanto, que tal tecnologia permite obtenção de produtos com um mesmo reator, o que não é possível com as técnicas tradicionais desenvolvidas separadamente para o alto-forno a coque e carvão vegetal. Nesta proposta, trabalha-se com um processo híbrido, onde os refratários e refrigeração das diferentes regiões do forno podem ser as mesmas, com pequenos ajustes para proteção do cadinho e região das ventaneiras.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J.A. Castro: A Multi-dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Based on Multi-fluid Model. Japan, 2000. Tese de Doutorado – Tohoku University.
2. M.B. Mourão, A. Yokoji, A. Malynowsky, C.A. Leandro, G.F.B. Lenz, C. Takano, E.E.C. Quites, E.F.Gentile, J.R.Bolota, R.J. Faço: Introdução à Siderurgia.São Paulo, 2007. ABM.
3. F.S. Machado: Comparação entre Finos de Carvão Vegetal e de Carvão Mineral para a Injeção nas Ventaneiras de um Alto-forno Siderúrgico. Seropédica, 2002. Dissertação de Mestrado – UFRRJ.
4. J.A. Castro, Salvino, I.M., A.W.S. Baltazar, Takano, C., Mourão, M.B. Silva, A.J., Analysis of the Sinter Strand Operating with different Fuels by Three-Dimensional Multiphase Model – ICSTI 4, 2006, 663.
5. J.A. Filho, P.S. Assis: Aspectos Técnicos da Injeção de Pó de Pneu em Altos-Fornos - Congresso Anual da ABM - Internacional, 61<sup>o</sup>, 2006.
6. C. Takano, M.B. Mourão, R.C. Nascimento, G.F.B. Lenz, D.M. Santos: Recycling of Solids Wastes Containing Iron from Integrated Steel-making Plants. In: Japan-Brazil Symposium on Dust Processing Energy Environment in Metallurgical Industries, 2<sup>th</sup>, 2000, p 49.

7. H.T. Makkonen, J. Heino, L. Laitila, A. Hiltunen, E. Poylio, J. Harkki: Optimisation of Steel Plant Recycling in Finland: Dusts, Scales and Sludge – Resources, Conservation and Recycling 35, 2002, 77.
8. J.H. Noldin Jr: Contribuição ao Estudo da Cinética de Redução de Briquetes Auto-redutores. Rio de Janeiro, 2002. Dissertação de Mestrado – PUC Rio.
9. J.A. Castro: Modelamento Matemático Bidimensional do Alto-forno para Análise do Processo. Volta Redonda, 1996. Dissertação de Mestrado – UFF.
10. J. Yagi: Recent Progress in Fundamental and Applied Researches in Blast Furnace Iron-making in Japan – ISIJ Int. 31, 1991, 387.
11. Y. Jianwei, S. Guolong, K. Cunjiang, Y. Tianjun: Oxygen Blast Furnace an Combined Cycle (OBF-CC) – an Efficient Iron-making and Power Generation Process – Energy 28, 2003, 825.
12. U.F. Matos: Análise da injeção Simultânea de Gás Natural e diferentes Misturas de carvões pulverizados (PCI) Utilizando o Modelo Total do Alto-forno. Volta Redonda, 2006. Dissertação de Mestrado – UFF.
13. J.A. Castro, A.W.S. Baltazar, A.J. Silva, J.C. D’Abreu, J. Yagi: Estudo da Viabilidade de Utilização de Pelota Auto-Redutora no Alto-forno através sa Simulação Computacional - Congresso Anual da ABM - Internacional, 59º, 2004.
14. J.A. Castro, A. J. Silva, H. Nogami, J. Yagi: Investigation of the Oxygen Blast Furnace Process by using a Multiphase Total Model. In: Japan-Brazil Symposium on Dust Processing Energy Environment in Metallurgical Industries, 5<sup>th</sup>, 2004.
15. J.A. Castro, A. J. Silva, E.L. Salgado, H. Nogami, J. Yagi: Investigation of the Blast Furnace Top Gas Recycling by using One Stage of Reforming and Injection into the Blast Furnace Shaft. In: Japan-Brazil Symposium on Dust Processing Energy Environment in Metallurgical Industries, 4<sup>th</sup>, 2002.
16. L.F.A. Castro, R.M. Figueira, R.P. Tavares: Princípios Básicos e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço Líquido. Belo Horizonte, 1985. Apostila: UFMG.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004-Resíduos Sólidos: Classificação.[Rio de Janeiro], 2004.
18. E.D. Freitas: Curso Básico de Programação em Linguagem FORTRAN-77. São Paulo, 2004. Apostila:USP.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)