

# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



**Dissertação de Mestrado**

**"Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte"**



**Autor: Carlos Frederico Campos de Assis**  
**Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis**



**Fevereiro de 2008**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Carlos Frederico Campos de Assis

## "Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais  
Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Ouro Preto, fevereiro de 2008.

A848c

Assis, Carlos Frederico Campos de.

Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte [manuscrito] / Carlos Frederico Campos de Assis . – 2008. xvi, 113 f.: il. color., grafs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e seleção de materiais.

1. Carvão vegetal - Teses. 2. Altos-fornos - Teses. 3. Materiais granulados - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 662.712

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**UFOP - CETEC - UEMG**  
Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



**“Caracterização de Carvão Vegetal para sua Injeção em  
Altos-Fornos a Carvão Vegetal de Pequeno Porte”**

**Autor(a): Carlos Frederico Campos de Assis**



Dissertação defendida e aprovada, em 14 de fevereiro de 2008, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Paulo Santos Assis (DSc) - Orientador  
Univ. Federal de Ouro Preto / DEMET / REDEMAT

Prof. Antônio Gêzar Faria Vilela (DSc)  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Antônio Maria Claret de Gouveia (DSc)  
Universidade Federal de Ouro Preto / DECAT / REDEMAT

## **Dedicatória**

Acima de tudo a Deus e ao grupo de estudo formado pelos alunos de graduação em Química Natália, Engenharia Metalúrgica Eric e Hugo, e ao Prof. Dr. Paulo Assis/DEMET. As minhas duas famílias República Necrotério e esposa Fabiana, filho Caio, mãe Zainha e irmãos.

## **Agradecimento**

Este projeto é fruto de dedicação e apoio de várias pessoas e entidades, as quais eu gostaria de agradecer e parabenizar pela conquista, são eles:

- A Deus pela força;
- ao grupo de estudo; formado pelos alunos de graduação em Química Natália, Eng. Metalúrgica Eric e Hugo pela paciência e ajuda;
- Ao Coordenador Prof. Dr. Paulo Assis/DEMET pelo direcionamento e confiança;
- a família; esposa Fabiana, filho Caio, mãe Zainha e irmãos pelo incentivo e apoio;
- a República Necrotério, irmãos por opção, pelo acolhimento e amizade;
- a REDEMAT pela oportunidade;
- a Capes pela bolsa de mestrado e incentivo a pesquisa;
- a empresa Calsete pelo apoio operacional.

*“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; Porque melhor é a sua mercadoria do que a mercadoria de prata, e a sua renda, do que o ouro mais fino. Mais precioso é do que os rubis, e tudo o que podes desejar não se pode comparar a ela.”*

*(Provérbios 3.13-15)*

<b>Sumário</b>	<b>Pág.</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Gerais</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Específicos</b>	<b>5</b>
<b>3. Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Alto-Forno</b>	<b>6</b>
<b>3.2 Carvão Vegetal</b>	<b>11</b>
<b>3.2.1 Caracterização do Carvão Vegetal</b>	<b>15</b>
<b>3.3 Injeção de Carvão Pulverizado em Alto-Forno</b>	<b>18</b>
<b>3.3.1 Cronologia Histórica</b>	<b>21</b>
<b>3.3.2 Objetivo e Vantagens</b>	<b>24</b>
<b>3.3.3 Contexto da ICP nas Usinas Siderúrgicas</b>	<b>30</b>
<b>3.3.4 Conceitos, Princípios e Efeitos</b>	<b>33</b>
<b>3.3.5 Instalações</b>	<b>53</b>
<b>3.3.6 Aspectos Econômicos</b>	<b>55</b>
<b>3.3.7 Misturas de Carvão Vegetal e Mineral Pulverizados para Injeção nas Ventaneiras de Alto-Forno</b>	<b>58</b>
<b>3.4 Injeção de Materiais Pulverizados em Alto-Forno</b>	<b>60</b>
<b>4. Desenvolvimento e Metodologia</b>	<b>66</b>
<b>4.1 Preparação de Amostra</b>	<b>66</b>
<b>4.2 Análise Química</b>	<b>68</b>
<b>4.2.1 Análise Química Imediata</b>	<b>68</b>
<b>4.3 Análise Granulométrica</b>	<b>71</b>
<b>4.4 Método de Adsorção de Nitrogênio – BET</b>	<b>72</b>
<b>4.5 Ensaio em Multipicnômetro a Gás</b>	<b>73</b>
<b>4.6 Análise Microscópica – MEV</b>	<b>74</b>
<b>4.7 Análise Termogravimétrica – TGA/DTA</b>	<b>76</b>
<b>4.8 Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados no Alto-Forno</b>	<b>77</b>
<b>5. Resultados e Discussões</b>	<b>85</b>
<b>6. Conclusões</b>	<b>104</b>
<b>7. Recomendações</b>	<b>105</b>
<b>8. Revisão Bibliográfica</b>	<b>106</b>

<b>Lista de Figuras</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1</b> – Taxas de injeção de carvão mineral em alguns altos-fornos a coque. Médias anuais	<b>4</b>
<b>Figura 3.2</b> – Esquema indicando as regiões componentes do corpo do Alto-forno	<b>7</b>
<b>Figura 3.3</b> – Zonas internas do Alto-forno	<b>8</b>
<b>Figura 3.4</b> – Fotografia de Carvão Vegetal Granulado	<b>11</b>
<b>Figura 3.5</b> – Fornos Missouri – Vallourec & Mannesmann Tubes	<b>12</b>
<b>Figura 3.6</b> – Análise Termogravimétrica de Madeira e seus Componentes	<b>13</b>
<b>Figura 3.7</b> - Fluxograma de processo de uma instalação de ICP	<b>19</b>
<b>Figura 3.8</b> – Figura esquemática de injeção de carvão pulverizado em alto-forno através das ventaneiras	<b>20</b>
<b>Figura 3.9</b> - Primeira patente inglesa e alemã para ICP	<b>23</b>
<b>Figura 3.10</b> - Evolução histórica de altos-fornos operados mundialmente com injeção de carvão pulverizado	<b>24</b>
<b>Figura 3.11</b> – Consumo específico de carvão injetado relacionado ao consumo específico de coque	<b>24</b>
<b>Figura 3.12</b> - Taxas de injeção (kg/t de gusa) e ‘ <i>choke-rate</i> ’ (kg/t de gusa), valores médios mensais, obtidos em algumas usinas siderúrgicas no mundo	<b>27</b>
<b>Figura 3.13</b> - Influência da injeção de carvão vegetal bruto do alto-forno 1 Vallourec & Mannesmann Tubes	<b>28</b>
<b>Figura 3.14</b> - Influência da ICP na produtividade do alto-forno 1 da Vallourec & Mannesmann Tubes	<b>29</b>
<b>Figura 3.15</b> – Fluxograma de emissão de gases na produção de aço líquido pela rota de coque e carvão vegetal	<b>30</b>
<b>Figura 3.16</b> - Distribuição esquemática do carvão vegetal na Acesita com ICP somente no alto-forno	<b>31</b>
<b>Figura 3.17</b> – Modelo de combustão da partícula de carvão injetado	<b>35</b>
<b>Figura 3.18</b> - Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo	<b>37</b>
<b>Figura 3.19</b> – Perda de pressão do gás em camadas de coque, sínter e pelota, dentro das faixas granulométricas industriais	<b>39</b>
<b>Figura 3.20</b> – Relação entre a taxa de injeção de carvão e o índice de permeabilidade no alto-forno	<b>40</b>
<b>Figura 3.21</b> – Influência do teor de carbono e de matéria volátil na taxa de substituição	<b>41</b>
<b>Figura 3.22</b> – Esquema representativo de estrutura de coque no nível das ventaneiras do alto-forno	<b>44</b>
<b>Figura 3.23</b> – Efeito da temperatura de sopro e da umidade do ar sobre a temperatura de chama no alto-forno	<b>46</b>
<b>Figura 3.24</b> - Efeito da temperatura de sopro e do enriquecimento do ar sobre a temperatura de chama do alto-forno	<b>46</b>
<b>Figura 3.25</b> – Previsão das alterações no alto-forno em função do aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado	<b>48</b>
<b>Figura 3.26</b> – Influência do diâmetro da partícula de carvão pulverizado sobre o tempo total de combustão para diferentes temperaturas da fase gasosa	<b>49</b>
<b>Figura 3.27</b> – Eficiência da combustão em função da razão estequiométrica	<b>49</b>
<b>Figura 3.28</b> – Influência da taxa de injeção de finos sobre a temperatura de chama (parâmetro é a temperatura de sopro)	<b>51</b>

<b>Figura 3.29</b> – Influência do teor de oxigênio sobre a taxa de injeção de finos	<b>52</b>
<b>Figura 3.30</b> - Fluxograma genérico de injeção de carvão pulverizado em alto-forno	<b>53</b>
<b>Figura 3.31</b> – Efeito da simulação de carvão e dolomita nos fenômenos da “ <i>raceway</i> ” e componentes do ferro gusa	<b>62</b>
<b>Figura 4.32</b> – Fotografia do recipiente plástico de armazenamento das amostras	<b>67</b>
<b>Figura 4.33</b> – Fotografia do equipamento utilizado para análise elementar, modelo PE 2400II CHN Analyzer, do departamento de química da UFMG.	<b>71</b>
<b>Figura 4.34</b> – Representação fotográfica do equipamento utilizado para análise de porosidade e área superficial, modelo NOVA 1000	<b>72</b>
<b>Figura 4.35</b> – Representação fotográfica do aparelho Picnômetro a gás utilizado para análise de densidade real	<b>73</b>
<b>Figura 4.36</b> – Representação fotográfica do MEV utilizado para ensaios	<b>75</b>
<b>Figura 4.37</b> – Representação fotográfica do equipamento de ensaio termogravimétrico, modelo SDT 2960, no departamento de química da UFOP	<b>76</b>
<b>Figura 4.38</b> – Ambiente do alto-forno ao qual se refere ao estudo da qualidade do carvão vegetal.	<b>77</b>
<b>Figura 4.39</b> – Equipamento disponível no Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas, para simular a injeção de carvão pulverizado em altos-fornos	<b>78</b>
<b>Figura 4.40</b> - Esquema das regiões do simulador apresentado na figura 4.39.	<b>79</b>
<b>Figura 4.41</b> - Vista geral da ampola de vidro para coleta de gás	<b>81</b>
<b>Figura 4.42</b> - Vista geral do analisador de gás ORSAT	<b>82</b>
<b>Figura 4.43</b> – Recipiente usado para armazenar o carvão pulverizado para o ensaio de combustão	<b>83</b>
<b>Figura 5.44</b> – Relação entre tamanho de grão médio e volume total de poros	<b>87</b>
<b>Figura 5.45</b> – Relação entre tamanho de grão médio e volume de microporo	<b>87</b>
<b>Figura 5.46</b> – Relação entre tamanho de grão médio e área dos microporo	<b>88</b>
<b>Figura 5.47</b> – Relação entre tamanho de grão médio e superfície específica	<b>88</b>
<b>Figura 5.48</b> – Relação entre superfície específica e volume de poros	<b>89</b>
<b>Figura 5.49</b> – Relação entre superfície específica e volume de microporo	<b>89</b>
<b>Figura 5.50</b> – Representação fotográfica de MEV, da amostra G2	<b>90</b>
<b>Figura 5.51</b> – Representação fotográfica de MEV, da amostra G2	<b>90</b>
<b>Figura 5.52</b> – Representação fotográfica de MEV, da amostra AP	<b>91</b>
<b>Figura 5.53</b> – Representação fotográfica de MEV, da amostra AP	<b>91</b>
<b>Figura 5.54</b> – Representação fotográfica de MEV, da amostra G3	<b>92</b>
<b>Figura 5.55</b> – Relação entre carbono fixo e temperatura de pico ( $T_p$ ), calculada pela técnica de TGA	<b>93</b>
<b>Figura 5.56</b> – Relação entre tamanho de grão e temperatura de pico ( $T_p$ ), calculada pela técnica de TGA	<b>94</b>
<b>Figura 5.57</b> – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando carbono fixo	<b>96</b>
<b>Figura 5.58</b> – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando umidade de carvão	<b>97</b>
<b>Figura 5.59</b> – Relação entre taxa de injeção e o índice de combustão, variando a granulometria e a taxa de injeção	<b>97</b>
<b>Figura 5.60</b> – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, para o carvão beneficiado usado para ICP, na Calsete	<b>98</b>
<b>Figura 5.61</b> – Relação entre volume total de poros e índice de combustão, variando a taxa de injeção.	<b>99</b>

<b>Figura 5.62</b> – Relação entre volume de microporo e índice de combustão, variando a taxa de injeção	<b>99</b>
<b>Figura 5.63</b> – Relação entre superfície específica e índice de combustão, variando a taxa de injeção	<b>99</b>
<b>Figura 5.64</b> – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 60kg/t gusa	<b>100</b>
<b>Figura 5.65</b> – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 100kg/t gusa	<b>101</b>
<b>Figura 5.66</b> – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 120kg/t gusa	<b>101</b>
<b>Figura 5.67</b> – Relação entre Taxa de injeção e taxa de combustão, para as amostras C3 e U3	<b>102</b>

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabela I.1</b> – Produção total de ferro-gusa no Brasil	<b>2</b>
<b>Tabela I.2</b> - Altos-fornos, de pequeno porte, a carvão vegetal no Brasil com ICP	<b>3</b>
<b>Tabela III.3</b> – Análise elementar da madeira (Valores em % peso)	<b>14</b>
<b>Tabela III.4</b> – Análise Química Imediata do Carvão Vegetal e Rendimento em Carbono Fixo	<b>15</b>
<b>Tabela III.5</b> – Influência da temperatura de carbonização nas propriedades química e física final do carvão vegetal	<b>15</b>
<b>Tabela III.6</b> - Cronologia mundial da injeção de carvão pulverizado	<b>21</b>
<b>Tabela III.7</b> - Cronologia brasileira da injeção de carvão pulverizado	<b>22</b>
<b>Tabela III.8</b> - Distribuição geográfica dos altos-fornos com ICP.	<b>23</b>
<b>Tabela III.9</b> - Níveis operacionais de coquerias associados a ICP, na USIMINAS.	<b>26</b>
<b>Tabela III.10</b> - Dados de produtividade e taxa de injeção com e sem ICP da Acesita	<b>29</b>
<b>Tabela III.11</b> - Propriedades de sinter e pelota requeridas em altos-fornos com injeção de carvão	<b>42</b>
<b>Tabela III.12</b> - Critérios para a qualidade do coque, utilizado em altos-fornos com injeção de carvão (dados da Europa)	<b>43</b>
<b>Tabela III.13</b> - Sistemas de injeção de carvão pulverizado no mundo	<b>54</b>
<b>Tabela III.14</b> - Alguns tipos de transporte pneumático, sistemas de moagem e empresas de projeto	<b>54</b>
<b>Tabela III.15</b> - Algumas unidades de injeção implementadas no Brasil, referente aos PIG desde 2002	<b>55</b>
<b>Tabela III.16</b> - Matriz de custo do carvão injetado nos altos-fornos da Acesita	<b>57</b>
<b>Tabela III.17</b> - Valores médios dos dados utilizados para o cálculo da economia obtida com a injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos da Acesita	<b>57</b>
<b>Tabela III.18</b> - Parâmetros operacionais para injeção simultânea	<b>59</b>
<b>Tabela III.19</b> - Composição dos combustíveis	<b>59</b>
<b>Tabela III.20</b> - Principais parâmetros operacionais dos AF da usina siderúrgica japonesa NKK antes e depois da implantação da injeção de sucata plástica	<b>63</b>
<b>Tabela III.21</b> - Efeito de cinco tipos de injeção em parâmetros do alto-forno, baseado em modelo matemático	<b>64</b>
<b>Tabela III.22</b> - Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e sucata plástica	<b>65</b>
<b>Tabela IV.23</b> - Amostras identificadas de acordo com a sua análise específica	<b>67</b>
<b>Tabela IV.24</b> – Divisão de amostra por ensaios a realizar pelas técnicas	<b>68</b>
<b>Tabela IV.25</b> – Divisão de ensaios por amostra para ICP, $E_{O_2} (\%) = 0$	<b>84</b>
<b>Tabela V.26</b> – Características dos Altos-fornos e ICP da Calsete	<b>85</b>
<b>Tabela V.27</b> – Representação da análise química e granulométrica do carvão vegetal caracterizado	<b>86</b>
<b>Tabela V.28</b> – Resultados de parâmetros de porosidade e densidade real de carvão vegetal	<b>86</b>
<b>Tabela V.29</b> – Dados da análise de carvão vegetal utilizando a técnica de TGA	<b>92</b>
<b>Tabela V.30</b> – Resultados dos ensaios de combustão com elevado gradiente térmico	<b>95</b>

## Lista de Notações

A - Ponto de coleta de gás

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF - Alto-Forno

AP - Identificação de amostra, Pó Típico

BEP - Barril Equivalente de Petróleo

BET - Brunauer, Emmet & Teller

C1 - Identificação de amostra, carbono fixo

C2 - Identificação de amostra, carbono fixo

C3 - Identificação de amostra, carbono fixo

CCB - Custo do carvão bruto [US\$/m<sup>3</sup>]

CCI - Custo do carvão injetado [US\$/t]

CEA - Consumo Específico de Ar

CECA - Consumo específico de redutor, com ICP, em kg/t (via topo)

CECBI - Consumo específico de carbono fixo via ICP, kg/t

CECBT - Consumo específico de carbono fixo total, kg/t

CECR - Consumo específico de redutor de referência, sem ICP, em kg/t (via topo)

C<sub>fixo</sub> - teor de carbono fixo, em %

CHN – Análise química elementar Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio

CI - Índice de combustão (combustibilidade)

CSR – Coke Strength after Reaction (=Resistência do coque após reação)

CZ - Teor de cinzas, em %

d - Densidade real do material analisado

d<sub>1</sub> - Peso específico do carvão bruto [kg/ m<sup>3</sup>]

DTG – Diferencial Termogravimétrica

E - Economia anual [US\$/ano]

E<sub>O2</sub> – Enriquecimento do ar em oxigênio

F - Fator de conversão de carvão granulado para carvão bruto

F – Filtro

FI - Forno elétrico de simulação da zona de combustão do alto-forno

FP - Forno elétrico de pré-aquecimento

G1 - Identificação de amostra, granulometria

G2 - Identificação de amostra, granulometria

G3 - Identificação de amostra, granulometria

GAF – Gás de Alto-Forno

HGI - Hardgrove Grindability Index

I20 – IRSID 20: Índice de resistência do coque baseado no ensaio do IRSID

I40 - IRSID 40: Índice de resistência do coque baseado no ensaio do IRSID

IC - Índice de combustibilidade

ICP - Injeção de Carvão Pulverizado

IMF - Injeção de Minério de Ferro

ISO – Internation Standard Organization

K - Constante de permeabilidade ( $\text{atm}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$ )

K<sub>1</sub> - Índice de permeabilidade

K<sub>s</sub> – Índice de permeabilidade

K<sub>u</sub> - Índice de permeabilidade

LTB – Low Temperature Breakdown (usado para ensaios de fontes de ferro para reatores de redução)

m - Massa da amostra, em g

$m_0$  - Massa inicial de amostra, em g

$m_1$  - Massa final da amostra, em g

M10 – Micum 10 (para medir resistência a frio do coque, ensaio Micum)

$m_2$  - Massa inicial do cadinho mais amostra, em g

$m_3$  - Massa final do cadinho mais resíduo, em g

M40 - Micum 40 (para medir resistência a frio do coque, ensaio Micum)

$m_a$  - Massa da amostra de carbono injetada em miligramas

MEV - Microscópio eletrônico de Varredura

$m_p$  - Massa do material analisado

MV - Teor de matérias voláteis, em %

NBR – Norma Brasileira

$n_g$  - Número de mols do gás depois da experiência

P - Produção anual de gusa [t/ano]

P1 - Manômetro de gás

$P_1$  - Pressão inicial

P2 - Manômetro de gás

$P_2$  - Pressão final

$P_c$  - Permeabilidade da carga ( $\text{Nm}^3/\text{h.atm}$ )

PC - Peso específico do carvão injetado [ $\text{kg/t gusa}$ ]

PCI – Pulverized Coal Injection

PCR - Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado

PIG - Produtor Independente de Gusa

Prod. – Produção de gusa por hora (t/h)

$P_s$  - Pressão do ar no alto-forno (atm)

$P_t$  - Pressão do gás no topo do alto-forno (atm)

PVC – Material plástico (=Poli-Vinil-Cetato)

R1 - Dispositivo de resfriamento

R2 - Dispositivo de resfriamento

R3 - Dispositivo de resfriamento

$R_{cv}$  - Rendimento de carbonização

RDI – Reduction Degration Index (=Índice de degradação após redução)

Rmáx. - Reatividade máxima

S - Abertura para injeção de material (amostra)

$T_b$  - Temperatura de “*bumout*”

TGA - Análise Termogravimétrica

$T_i$  - Temperatura inicial

TIH - Taxa de Injeção Horária

TIP - Taxa de Injeção de Carvão

$T_p$  - Temperatura de pico

$T_R$  - Temperatura de Redução

TS - Taxa de substituição

TU - Teor de umidade, em%

TUCI - Taxa de Utilização de Carbono

U1 - Identificação de amostra, umidade

U2 - Identificação de amostra, umidade

U3 - Identificação de amostra, umidade

USD – Dólar Americano (United States Dollar)

V1 - Válvula eletromagnética

V2 - Válvula eletromagnética

V<sub>c</sub> - Volume de referência do cadinho

v<sub>g</sub> - Velocidade do gás no interior do alto-forno (m/s)

V<sub>g</sub> - Volume de gás que atravessa o forno por unidade de tempo (Nm<sup>3</sup>/h)

V<sub>p</sub> - Volume real do material analisado

V<sub>p</sub> - Volume real do material analisado

V<sub>r</sub> - Volume de referência do gás Hélio

VS - Vazão de ar soprado

Vu - Volume Útil

?P - Queda de pressão

?H<sup>0</sup><sub>298</sub> - Variação de Entalpia padrão

e - Fração de vazios existentes entre as partículas que compõem a carga

μ - Micro – 10<sup>-6</sup>

s - Taxa de Substituição

## Resumo

O Brasil produz cerca de 35 % do ferro gusa através de altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte (volume útil  $< 300\text{m}^3$ ), gerando com isto resíduo, entre eles carvão vegetal fino (moinha). Este projeto estuda o reaproveitamento da moinha utilizada em ICP (Injeção de Carvão Pulverizado). O foco principal é o comportamento do carvão vegetal pulverizado injetado, através das ventaneiras, na zona de combustão destes altos-fornos. Utilizou-se para isto um equipamento de simulação, levando em consideração as peculiaridades destes reatores. Dentro deste contexto, variáveis que influenciam na técnica ICP são analisadas. Como propriedades do carvão vegetal (são elas tamanho de grão, carbono fixo, porosidade, densidade e umidade) e a taxa de injeção. Os dados são analisados cotejados com a literatura, bem como com os fundamentos do processo. Foram utilizadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura, análise de porosidade via BET, utilização de TGA, determinação de parâmetros químicos do carvão vegetal, tais como análise imediata e elementar.

Concluiu-se que existe possibilidade de elevar a taxa de injeção de carvão pulverizado em pequenos altos-fornos a carvão vegetal, graças a alterações na seleção do carvão e alterações em parâmetros do processo. O ensaio para simulação do que ocorre nas ventaneiras de altos-fornos, sob elevado gradiente térmico permite determinar os principais parâmetros para otimização da ICP. Parâmetros físicos não são limitantes ao aumento da taxa de injeção, sendo que a análise imediata pode ser usada como fator importante que afeta o índice de combustão do carvão vegetal. Aumentos da granulometria podem ser favoráveis sob o ponto de vista econômico para a prática de injeção de carvão vegetal em pequenos altos-fornos.

## **Abstract**

Hot metal in small blast furnaces (working volume  $< 300 \text{ m}^3$ ) in Brazil represents ca. of 35 % of all of hot metal produced in the country, generating a waste, the charcoal fines. This Project studies the use of this waste into Powder Coal Injection Installations. The main point studied is the behavior of charcoal to be injected into the tuyeres of blast furnaces. This way, a Simulator was used considering the main issues of the blast furnaces reactors. Under this context, a variable that influences the technique was studied. Properties, like grain size, fixed carbon, porosity, density and humidity and powder coal injection have been studied. All of obtained data were analyzed and compared based on process fundamentals. Techniques like Electronic Microscopy, BET porosity, TGA, chemical parameters, like immediate analysis and elemental.

It was concluded that there is a possibility to increase the powder charcoal injection in small blast furnaces, due to modifications on charcoal selection and process parameters. The equipment for simulate what occurs into the tuyeres of blast furnaces, under high thermal gradient permits the determination of the main parameters for powder charcoal injection. Physical parameters does not limit the increase of charcoal injection rate, other side the immediate analysis can be used as main factor that affects the powder charcoal injection. Increase of grain size can improve under the economical point of view the charcoal powder injection into the small blast furnaces.

## 1. Introdução

A siderurgia mundial apresentou em 2006, produção de aço da ordem de 1,27 bilhões de toneladas. Nunca se produziu tanto aço no mundo quanto nesse ano. O que se espera é que no ano de 2007 estes recorde seja batido<sup>1</sup>, e aumentos substantivos nos próximos anos. No Brasil, a produção continuou no patamar de 33 milhões de toneladas de aço<sup>1</sup>. Existem vários planos de se acelerar ainda mais esta produção, podendo atingir nos próximos 10 anos cerca de 77 milhões de toneladas anuais<sup>2</sup>. Esta produção de aço é dividida, no caso brasileiro, em duas grandes rotas: a rota alto-forno – convertedor LD e a rota Sucata – Forno Elétrico a Arco. Existe ainda no nosso caso, uma empresa que produz ferro-esponja, a Gerdau-Usiba, que complementa a sucata em aciarias elétricas. Todavia, representa um percentual mínimo de aço via esta alternativa. Todo o metal primário (ferro-gusa) produzido no Brasil provém de altos-fornos a coque ou a carvão vegetal.

Especificamente no caso brasileiro, 34% de todo o ferro-gusa foi produzido em altos-fornos a carvão vegetal<sup>3</sup>, sendo o maior produtor no mundo neste caminho. Cerca de 5% desta produção, em 2006, foi feita por usinas integradas (exemplo da Acesita, V&M e Gerdau de Divinópolis e Barão de Cocais), sendo este metal primário, no estado líquido, direcionado a aciaria para produção de aço, é importante salientar que a Gerdau de Divinópolis utiliza uma aciaria EOF (Energy Optimizing Furnace). O restante, ou seja, 29% de todo o ferro gusa produzido no país provêm de usinas não-integradas, que normalmente não dispõem de grandes desenvolvimentos tecnológicos, nem de investimentos em tecnologias de ponta, o que não acontece nas usinas siderúrgicas integradas a carvão vegetal ou coque. A tabela I.1 mostra a distribuição de produção de ferro nos três setores, nos últimos 5 anos. A balança comercial do país é favorecida por este fato, pois praticamente toda a produção de metal, que é feita nos altos-fornos a carvão vegetal é direcionada para exportação<sup>3,4</sup>. O setor da economia que é responsável

---

<sup>1</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico <http://www.ibs.org.br/estatisticas.asp> site do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), no dia 15/01/2008.

<sup>2</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico [http://www.abmbrasil.com.br/news/noticia\\_integra.asp?cd=2292](http://www.abmbrasil.com.br/news/noticia_integra.asp?cd=2292) do portal da ABM Brasil, no dia 15/01/2008.

<sup>3</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico [http://www.sindifer.com.br/Anuario\\_2007.html](http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html) do site do Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), no dia 15/01/2008.

<sup>4</sup> Contatos pessoais com técnicos dos PIG e setor a coque, em setembro de 2006, seminário nacional realizado em Ouro Preto, organizado pela ABM.

por este fato é o Setor Independente de Gusa (PIG)<sup>3</sup>. Estes produtores, erroneamente chamados de Guseiros (elisão de Gusa com Fazendeiro), estão cada dia mais preocupados com o insumo que é a mola mestra do setor: o carvão vegetal.

**Tabela I.1** – Produção total de ferro-gusa no Brasil<sup>6</sup> (Unidade: Milhões de toneladas).

Ano	Carvão Vegetal		Coque	Total
	Usinas Integradas	Produtores Independentes	Usinas Integradas	
<b>2002</b>	1,29	6,75	21,59	29,64
<b>2003</b>	1,34	8,10	22,56	32,01
<b>2004</b>	1,44	10,08	23,22	34,76
<b>2005</b>	1,64	9,77	22,46	33,88
<b>2006</b>	1,70	9,46	21,27	32,45

O redutor carvão vegetal representa na matriz de custo mais de 55% de todo o custo do metal<sup>5,6</sup>. É nele que tem sido feito esforços para a redução de seu consumo ao longo dos anos. Minas Gerais é o estado que detém hoje a maior produção de ferro-gusa a carvão vegetal, seguido do Maranhão e do Pará<sup>6</sup>.

Para se atingir o objetivo de reduzir o consumo de redutor, uma técnica tem sido usada indiscriminadamente no mundo (praticamente em todos os altos-fornos a coque do mundo), que é a injeção de carvão pulverizado (ICP) pelas ventaneiras dos altos-fornos. No caso das usinas não integradas a carvão vegetal, que se constituem os PIG, somente nos últimos dez anos é que tem sido aplicada, ainda de forma incipiente esta tecnologia, tendo sido iniciada em 1996 em uma usina situada no Maranhão (Viena Siderurgia). Posteriormente, outras empresas foram aderindo a esta tecnologia, sendo hoje uma das técnicas de maior perspectiva de crescimento neste setor, pois somente 15% destes altos-fornos possuem ICP, como mostra tabela I.2. Certamente existe uma carência muito grande no estudo tecnológico e científico do carvão vegetal que possa além de melhorar os índices atualmente obtidos, dinamizar e incentivar as empresas que ainda não adotaram a técnica o fazerem sob o risco de se tornarem não competitivas no

<sup>5</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico <http://www.showsite.com.br/silvimiras/html/index.asp?Metodo=ExibirLista&Grupo=4%20&SubGrupo=32> do site do Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), no dia 15/01/2008.

<sup>6</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico [http://www.sindifer.com.br/Anuario\\_2007.html](http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html) do site do Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), no dia 15/01/2008.

mercado globalizado desta “commodity” que é o ferro-gusa. Somente para exemplificar, um índice fundamental que caracteriza a evolução da aplicação tecnológica é a taxa de injeção de carvão. No caso das empresas brasileiras, que constituem os PIG, este valor tem se situado na faixa de 60 a 80kg/t gusa<sup>7</sup>. No caso das usinas integradas a carvão vegetal, a taxa de injeção está na média de 140kg/t gusa<sup>7</sup>, enquanto que para usinas a coque este índice está acima de 170kg/t gusa, como mostra a figura 1.1. Esta figura mostra dados obtidos em altos-fornos a coque que tem praticado a técnica. São dados anuais obtidos ainda na década passada.

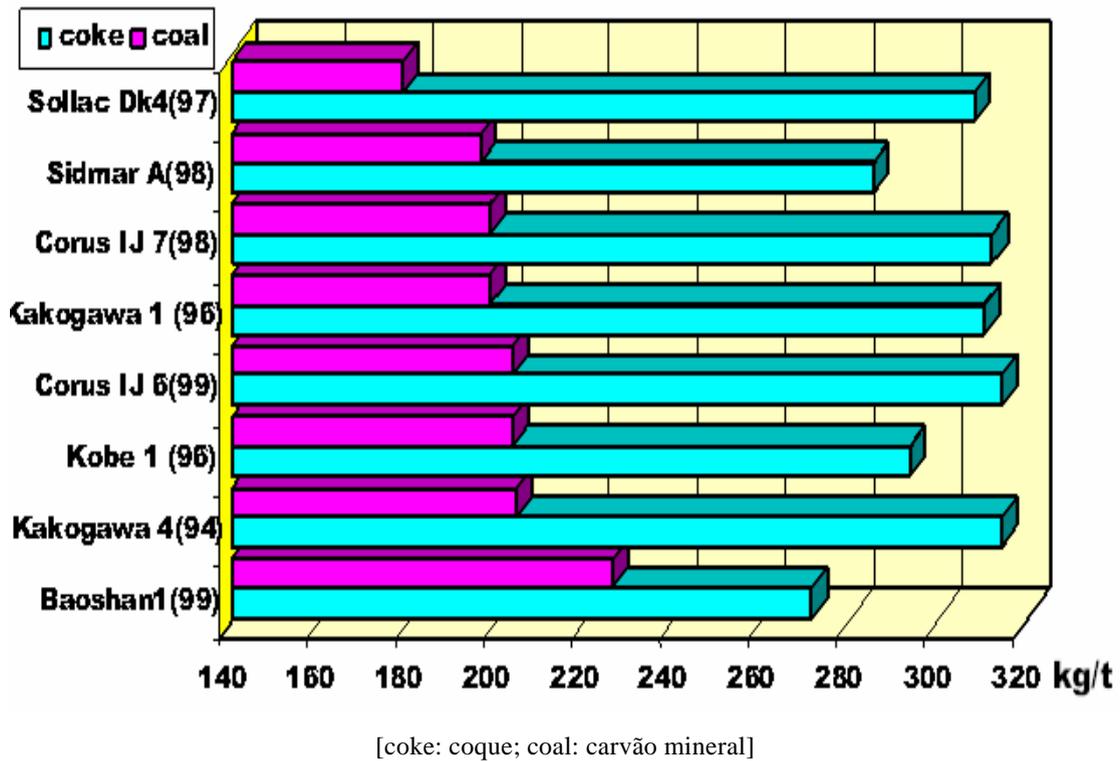
**Tabela I.2** - Altos-fornos, de pequeno porte, a carvão vegetal no Brasil com ICP, 2007<sup>7</sup>.

	<b>Total de Empresas</b>	<b>Total de AF</b>	<b>Total de Empresa com ICP</b>	<b>Total de AF com ICP</b>
<b>Quantidade</b>	83	153	8	22

Portanto, existe um hiato muito grande entre o setor independente de gusa (PIG) e o que se pratica no mundo para tornar a aplicação desta tecnologia ou técnica, economicamente viável para este setor tão importante para o país.

---

<sup>7</sup> Tabela formada com dados fornecidos pela Clyde Materials Handling, 2007 e do site Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), endereço eletrônico [http://www.sindifer.com.br/Anuario\\_2007.html](http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html), no dia 15/01/2007.



**Figura 1.1** – Taxas de injeção de carvão mineral em alguns altos-fornos a coque.  
Médias anuais <sup>[1]</sup>

Este trabalho incentiva as empresas do setor PIG que não possui esta tecnologia e ajuda a alavancar de vez os desenvolvimentos daqueles que já estão praticando injeção de carvão vegetal pulverizado, alcançando com isto maior competitividade no mercado mundial. Este projeto dividiu-se em uma resenha bibliográfica sobre o tema, apresentação da metodologia abordada, resultados, a sua discussão, conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Gerais**

- Estudar o comportamento do carvão vegetal pulverizado em altos-fornos de pequeno porte  $V_u < 300\text{m}^3$  (Volume útil), considerando as condições restritivas reinantes nestes reatores.

### **2.2 Específicos**

- Mostrar dados técnicos operacionais de um alto-forno dos PIG que injetam carvão pulverizado;
- Proceder a amostragem de carvão vegetal pulverizado para o seu estudo;
- Caracterizar o carvão vegetal no tocante a sua composição química imediata;
- Caracterizar o carvão vegetal usando MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura (com aumentos de até 6000x);
- Analisar a porosidade e densidade do carvão vegetal pulverizado utilizando o BET;
- Estudar o comportamento de carvões vegetais frente às condições severas reinantes no alto-forno, alterando algumas características tais como distribuição granulométrica, umidade, carbono fixo;
- Estudar o comportamento de carvões vegetais frente às condições severas reinantes no alto-forno alterando a taxa de injeção de carvão pulverizado;
- Desenvolver correlações entre as variáveis do carvão vegetal e os resultados advindos do comportamento da combustão frente às condições severas reinantes no alto-forno;

### 3. Revisão Bibliográfica

Procura-se neste capítulo dar uma visão geral da injeção de materiais pulverizados no alto-forno, notadamente do carvão vegetal. A substituição do coque pelo carvão mineral pulverizado já é comprovada e estudada a sua eficácia em alto-forno, o conhecimento desta tecnologia na substituição de carvão vegetal por moinha (fino de carvão vegetal) pulverizada é ainda olhada com certa desconfiança pelos PIG e cientificamente possui muito pouco na literatura. Então é utilizado nesta “resenha” bibliográfica alguns dados da aplicação da injeção de carvão mineral pulverizado em alto-forno a coque. A injeção de outros materiais sólidos ainda constitui tecnologia em desenvolvimento. Doravante, a injeção de carvão pulverizado será referida como ICP (em inglês, PCI = **P**ulverized **C**oal **I**njection). Nos dois primeiros subitens será feita uma introdução ao alto-forno e carvão vegetal. O alto-forno é um aparelho metalúrgico que têm como finalidade produzir ferro-gusa, matéria-prima da produção de aço e a instalação ICP faz parte do alto-forno como um aparelho metalúrgico secundário e a moinha de carvão vegetal é utilizada na ICP como matéria-prima. Após este dois itens, a ICP será descrita.

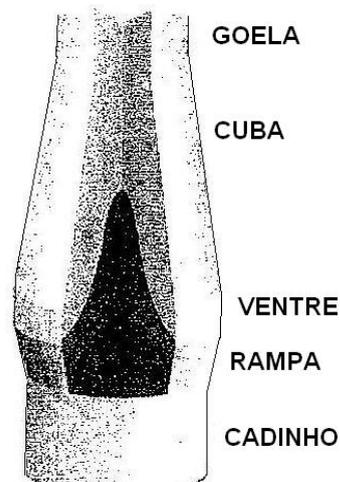
#### 3.1 Alto-forno

O alto-forno atualmente continua sendo o principal equipamento para produção de ferro primário (ferro-gusa) no mundo, responsável por cerca de 60% do aço produzido mundialmente<sup>8</sup>. Usam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (Calcário, Dolomita e Quartzo), variando de acordo com o alto-forno e a própria matéria-prima. Eventualmente alguns altos-fornos prescindem do uso de fundentes, usando para isto carga metálica aglomerada auto-fundente. A redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras<sup>[2]</sup>. Os produtos formados pela interação e reações entre gases e matérias-primas são escória, ferro-gusa, gases, poeira e lama.

---

<sup>8</sup> Dados obtidos do endereço eletrônico <http://www.ibs.org.br/estatisticas.asp> site do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), no dia 15/01/2008.

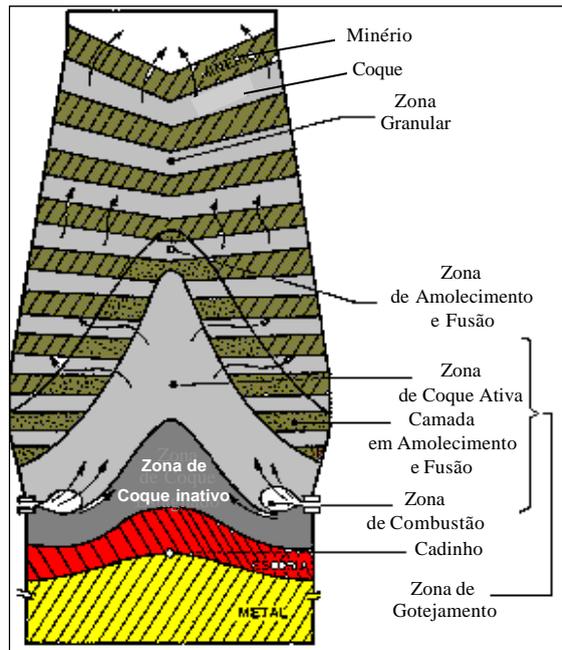
O corpo físico do alto-forno é dividido basicamente nas seguintes partes: goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, como mostrado na figura 3.2.



**Figura 3.2** – Esquema indicando as regiões componentes do corpo do Alto-forno <sup>[3]</sup>.

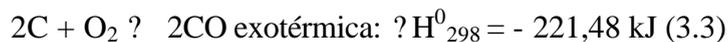
Neste corpo físico há de se destacar a região das ventaneiras, que é constituída por peças de cobre refrigeradas a água, situadas na parte superior do cadinho, por onde é injetado ar quente e os materiais pulverizados.

Com base em estudos em altos-fornos realizados na década de 1960 na URSS, 1970 no Japão e 1980 na Alemanha, onde os mesmos foram dissecados em operação, além de sondagens com fornos em operação e diversos outros estudos em vários países, cinco zonas internas principais nos altos-fornos foram definidas, conforme mostra esquematicamente a figura 3.3.



**Figura 3.3** – Zonas internas do Alto-forno<sup>[3]</sup>.

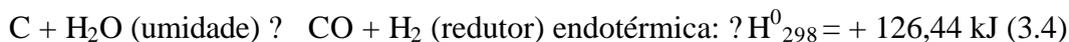
A zona de combustão é uma região parcialmente vazia em frente às ventaneiras, devido a elevada energia cinética do sopro de ar quente. À medida que as partículas de carvão vegetal ou coque circulam, vão sendo queimadas, gerando o gás redutor e energia. O carbono dos combustíveis reage com o oxigênio, produzindo uma mistura de monóxido e de dióxido de carbono, cuja proporção dependerá das condições de operação. A medida que se distancia do “bico” das ventaneiras, aumenta-se o teor de CO, sendo que no limite da zona de combustão, praticamente todo o CO<sub>2</sub> foi consumido, restando uma mistura gasosa constituída de CO, H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. As principais reações na zona de combustão são<sup>[3]</sup>:



As reações do vapor d’água serão apresentadas oportunamente.

Inicialmente ocorre a oxidação do carbono do coque pelo oxigênio do ar, conforme a reação (3.1), gerando grande quantidade de calor. Como o CO<sub>2</sub> é instável na presença de carbono acima de 1000°C, e existe carbono em excesso (coque ou carvão vegetal), a reação (3.2), conhecida como reação de Boudouard, ou de “*Solution Loss*” se desenvolve rapidamente. Desta forma, para efeito termodinâmico tudo se passa como se

somente ocorresse a reação (3.3), ou seja, que todo o oxigênio do ar injetado no alto-forno queima o carbono do coque produzindo CO, no limite da zona de combustão. O ar contém umidade cuja decomposição se dará segundo a reação (3.4)<sup>[3]</sup>:



A equação (3.4) explica o efeito refrigerante sobre a temperatura de chama proporcionado pela umidade do ar soprado. Este H<sub>2</sub> dependendo das condições termodinâmicas poderá participar da reação de redução da wustita (FeO<sub>x</sub>) em Fe, produzida durante a redução da carga metálica.

No caso de se ter injeção de carvão pulverizado (mineral ou vegetal), ele é injetado um pouco antes da zona de combustão através das ventaneiras juntamente com o ar quente, que pode ser enriquecido com oxigênio. O carvão é injetado, absorve calor, desvolatiliza-se e inicia a combustão logo que deixa a lança de injeção<sup>[3]</sup>.

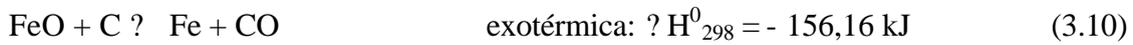
Uma operação de alto-forno com injeção de carvão apresenta alterações na zona de combustão (*raceway*), como na distribuição da temperatura, nas reações e no tamanho do “*raceway*”. Os gases que saem da zona de combustão também são alterados. Esses fenômenos serão analisados posteriormente.

As reações referentes a carga metálica podem ser divididas em dois caminhos, o primeiro refere-se a parte útil do minério (geralmente hematita) e a outra a ganga do minério (outros óxidos). A ganga forma a escória e a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) será reduzida (retirada de oxigênio) e formará o ferro gusa. A redução do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é realizada em estágios, conforme as seguintes equações (3.5), (3.6) e (3.7)<sup>[3]</sup>.



As reações (3.5), (3.6) e (3.7) são chamadas de reações de redução indireta e o produto é o CO<sub>2</sub>, e são levemente exotérmicas, com exceção da equação 3.6. Deve ser frisado que a reação global de redução da hematita a ferro, via CO, é uma reação exotérmica a 298K, gerando o correspondente a 2,72kcal/ mol Fe. Acima de 950°C/800°C (=T<sub>R</sub>), as

reações de redução se processam através do carbono do combustível (coque/carvão vegetal respectivamente) com o oxigênio do minério, como a seguir<sup>[2]</sup>:



Na verdade, as reações químicas que ocorrem em temperaturas superiores aquela temperatura  $T_R$  se dão de forma direta como as reações (3.8) a (3.10), e através da redução gasosa pelo CO, gerando  $\text{CO}_2$ , sendo que imediatamente este  $\text{CO}_2$  se combina com C, regenerando o poder redutor do gás, reação (3.2). Estima-se que na redução que ocorre nas temperaturas superiores a  $T_R$ , cerca de 5% do ferro é produzido pelas reações retro-mencionadas, o restante 95% através da reação do FeO com CO, e regeneração imediata de acordo com a reação de Boudouard.

As reações (3.8), (3.9) e (3.10) são chamadas de reações de redução direta e são altamente endotérmicas em contraste com a redução indireta e além disto consome e degrada o combustível. Aqui a demanda de calor, a 298K, envolvida na reação global de redução da hematita a ferro é da ordem de 167,96kJ por mol Fe. Para minimizar as necessidades térmicas do alto-forno é vantajoso que a redução indireta, reações (3.5) e (3.7), ocorra na maior proporção possível pois gera calor, enquanto a redução direta consome calor, além de consumir carbono para a reação de Boudouard.

A reação de redução pelo hidrogênio (3.11)<sup>[2]</sup> se processa a temperatura acima de 800°C. O hidrogênio pode ser introduzido no alto-forno (via  $\text{H}_2\text{O}$  gás), através dos insumos injetados (ar e carvão pulverizado), e procedente da umidade da carga. A introdução de hidrogênio, como componente de combustível injetado, move as condições de equilíbrio entre as reações na direção da redução direta<sup>[3]</sup>.



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

formação de vapor d'água, combustão do carbono, redução da umidade do sopro e outras. No caso deste trabalho, quando importantes, elas serão tratadas.

### 3.2 Carvão Vegetal

O carvão vegetal, como mostrado na figura 3.4, pode ser considerado como vetor energético de uso amplo, tanto que após o primeiro choque de preço do petróleo (1973) foi estimulada, pelo Governo Federal, a substituição do óleo combustível por carvão em vários setores da produção industrial, cabendo ao carvão vegetal uma participação expressiva nesse esforço. Entretanto, é na indústria metalúrgica que ele encontra seu melhor nicho de mercado por favorecer a produção de ferro-gusa praticamente isento de enxofre, fósforo e outros elementos indesejáveis. Esta indústria consome cerca de 90% de carvão produzido no Brasil, com o setor de ferro-gusa e aço detendo quase 85% do consumo de carvão <sup>[4]</sup>.



**Figura 3.4** – Fotografia de Carvão Vegetal Granulado.

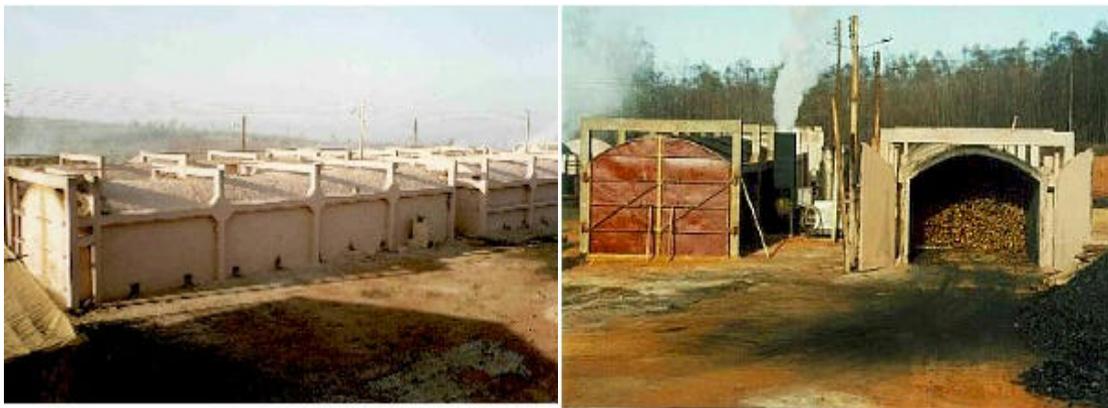
A principal matéria-prima para a fabricação do carvão vegetal é a madeira (lenha). Esta pode ser dividida em dois grupos principais, o grupo de madeira nativa e madeira de reflorestamento:

- Madeira nativa - provém do desmatamento das florestas do Brasil. Sendo suas espécies variadas de acordo com a região;
- Madeira de reflorestamento – provém do plantio de espécies para este fim. O eucalipto é o mais utilizado por causa das suas propriedades químicas, físicas e econômicas.

A madeira quando submetida a temperaturas elevadas, passa por um processo que transforma os seus componentes. Esse processo de transformação da madeira pelo calor pode ocorrer de diferentes maneiras:

- Pirólise - É todo o processo de destilação, sem a presença de oxigênio. Se houver uma quantidade de oxigênio suficiente para transformar toda a madeira em vapor e gases, restará como resíduo os óxidos minerais ou cinzas. (ex: fogueira ao ar livre, com queima total da madeira).

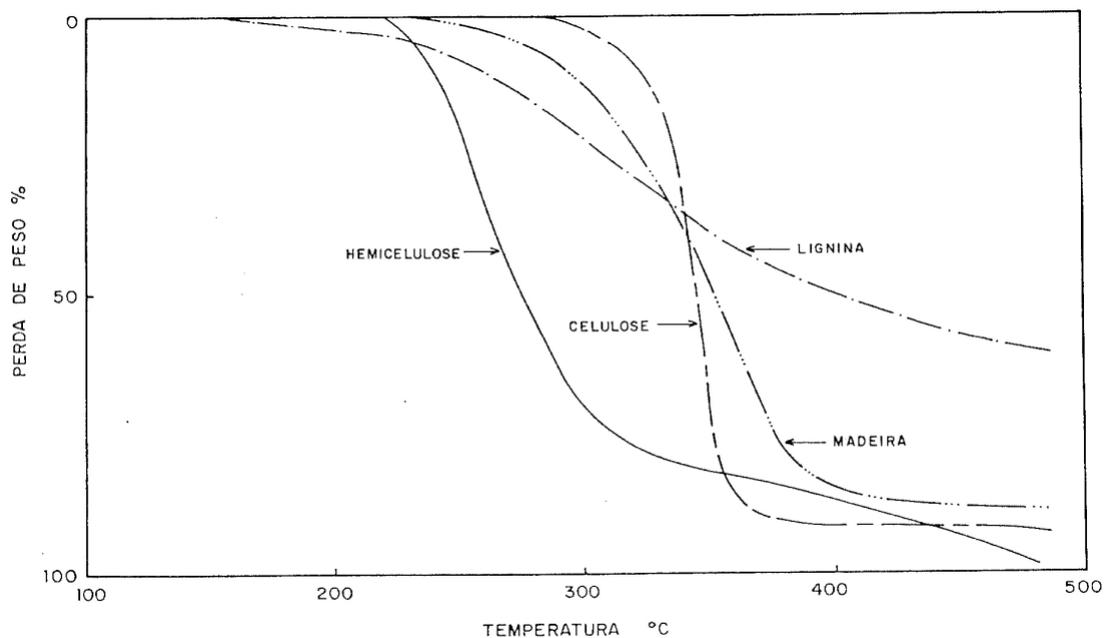
- Carbonização - Utilizado no sistema descontínuo (convencional), onde o oxigênio é controlado, libera água, líquidos orgânicos e gases não-condensáveis. O resíduo é o carvão vegetal. A figura 3.5 mostra um exemplo de equipamento, chamado de forno Missouri, que têm a finalidade de carbonizar a madeira.



**Figura 3.5** – Fornos Missouri – Vallourec & Mannesmann Tubes<sup>[7]</sup>.

A madeira (lenha) sofre um processo de carbonização quando aquecida em temperaturas acima de 280°C, seu comportamento diante deste processo pode ser representado pelo somatório do comportamento isolado dos seus três principais componentes que são a Celulose, Hemicelulose e Lignina. Embora tenha sido detectada uma pequena interação quando estes componentes estão juntos, os efeitos às vezes podem ser considerados quase desprezíveis e o estudo de cada um separadamente representa uma boa aproximação do fenômeno como um todo<sup>[6]</sup>.

A Lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização está diretamente relacionado com o conteúdo de lignina na lenha como é mostrado na figura 3.6<sup>[6,7 e 10]</sup>.



**Figura 3.6** – Análise Termogravimétrica de Madeira e Seus Componentes [6].

Embora a Lignina comece a se degradar (perda de peso) em temperatura mais baixa, a partir de 150°C, observa-se, ao contrário do comportamento da Celulose e Hemicelulose, que a sua degradação é mais lenta. A Lignina continua a perder peso mesmo em temperaturas superiores a 500°C, dando como resultado um resíduo carbonoso. A perda de peso final experimentada pela Lignina é bem menor do que os outros dois componentes da madeira [5,6,7 e 10], conforme inclusive se comprova pela figura 3.6.

A madeira é composta, principalmente, de carbono, hidrogênio e oxigênio. Existem, ainda, o nitrogênio e os sais minerais, os quais, juntos não representam 1%. Existem pequenas variações nas informações obtidas de diversos autores. Mas que não podem ser consideradas como conflitantes [5,6,7,10]. A tabela III.3 mostra a composição elementar da lenha, segundo diversas fontes.

**Tabela III.3** – Análise elementar da madeira (Valores em % peso)<sup>[5]</sup>.

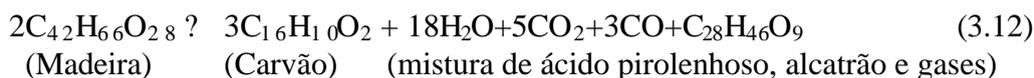
Composição Química	Referência						Média
	1	2	3	4	5*	5**	
<b>Carbono</b>	50,0	48,5-50,5	50,0	40,0	40,0	50,0	46,9
<b>Oxigênio</b>	44,0	43,0-45,0	43,5	34,2	34,0	42,5	40,8
<b>Hidrogênio</b>	6,0	6,0-7,0	6,0	4,8	4,8	6,0	5,7
<b>Nitrogênio+Cinzas</b>	<1,0						<1,0
<b>Nitrogênio</b>			0,1		0,4	0,5	0,3
<b>Cinzas</b>			0,4	1,0	0,8	1,0	0,8
<b>Água</b>				20,0	20,0		20,0

\* Lenha seca ao ar / \*\* Lenha anidra. Referências do Paper<sup>[5]</sup>

Após a carbonização, elementos participam no carvão em diferentes proporções. A reação de carbonização da lenha, expressa pela equação (3.12), tem vantagem de mostrar que o processo de carbonização consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto. A relação teor de carbono no carvão vegetal/ teor de carbono na lenha é de aproximadamente 1,7<sup>[6]</sup>.

O carvão vegetal consegue reter 57% do carbono inicial contido na lenha. O carbono restante, isto é, não contido no carvão vegetal, está contido nos gases e no líquido condensado. Por outro lado, em torno de 89% do oxigênio (contido na lenha) são expulsos sob a forma de gases e líquido condensado, contribuindo para melhorar o poder calorífico do carvão resultante<sup>[6]</sup>.

Teoricamente, o rendimento em carvão é de 34,5%, contendo 83,1% de carbono, quando carbonizado a 400°C. Klason e outros foram os primeiros a tentarem elaborar a equação que representaria os fenômenos que ocorrem com a carbonização da lenha, a 400°C<sup>[6]</sup>.



Na prática, indiferente do equipamento utilizado, deve-se ter sempre que possível, um controle dos parâmetros de carbonização, pois propriedades físicas e químicas podem ser modificadas, como mostrado na tabela III.4 e III.5. Por exemplo, aumento da

temperatura de carbonização aumentará a quantidade de carbono fixo, diminuindo os materiais voláteis, cinzas, umidade e o rendimento,  $R_{cv}$ , conforme equação (3.13).

$$R_{cv} = [(peso da madeira - peso do carvão).100]/peso da madeira \quad (3.13)$$

Outros parâmetros referentes à madeira como espécie, preparação para carbonização, idade e plantio também irão influenciar nas propriedades finais do carvão. As relações entre propriedades físicas e químicas do carvão vegetal com carbonização são mostrados nas tabelas III.4 e III.5, essas variações irão influenciar diretamente o desempenho do alto-forno e ICP.

**Tabela III.4 – Análise Química Imediata do Carvão Vegetal e Rendimento em Carbono Fixo<sup>[5]</sup>.**

Material	Temperatura de carbonização (°C)	Análise química imediata base seca (%)			H <sub>2</sub> O do carvão (%)	Rendimento em carvão, base seca (%)	Rendimento em carvão, base úmida (%)	Rendimento em carbono fixo (%)*
		Carbo-no fixo	Matéria-is voláteis	Cin-zas				
Eucaliptus Grandis 5,5 anos	450	75,06	21,03	3,91	4,17	32,89	28,2	23,66
	550	86,53	10,12	3,33	2,97	28,15	24,2	23,63
	700	89,82	7,20	2,93	2,41	27,57	23,0	24,17

Fonte: CETEC (2) \* Calculado: Rendimento em carvão(base seca) x %carbono fixo(base úmida) / 100

**Tabela III.5 – Influência da temperatura de carbonização nas propriedades química e física final do carvão vegetal. Adaptado de<sup>[5]</sup>.**

Temperatura Carbonização (°C)	Densidade aparente relativa (t/m <sup>3</sup> )	N° Poros – diâmetro médio (µm)	% Finos < 13mm (Teste de tamboramento)	Resistência à ruptura, kgf/cm <sup>2</sup> )	Aumento da reatividade em relação a 300°C
<b>300</b>	0,39±0,80	442 - 86,3	13,2	28,6±2,3	-
<b>500</b>	0,35±0,03	564 - 71,2	14,6	20,9±2,4	14%
<b>700</b>	0,39±0,05	430 - 73,6	12,9	34,3±5,9	19%

### 3.2.1 Caracterização do Carvão Vegetal

Algumas propriedades físicas e químicas do carvão vegetal são imprescindíveis conhecê-las para uma “boa marcha” (eficiência) do alto-forno. Isto também se emprega para ICP. A seguir essas propriedades serão comentadas.

### ***Porosidade***

Porosidade é a medida de espaço vazio “poros” em um material<sup>9</sup>, é uma característica singular do carvão vegetal influenciando na densidade, higroscopicidade e reatividade. A molhabilidade (ângulo entre a cavidade do poro da partícula e gás<sup>10</sup>) depende da porosidade, ou seja, maior molhabilidade, maior contato sólido e gases, ajudando assim a troca de calor entre gases-partícula e a cinética de combustão da partícula (reatividade).

### ***Densidade aparente***

É a massa contida de um dado material em uma unidade de volume, é expressa em kg de carvão/m<sup>3</sup> ou kg de carbono/m<sup>3</sup>. Fator importante para o alto-forno influenciando diretamente no volume disponível do alto-forno para a carga metálica implicando assim na produtividade<sup>[8]</sup>.

### ***Reatividade frente ao CO<sub>2</sub>***

É a característica que um combustível sólido tem de reagir com o dióxido de carbono, a uma determinada temperatura de acordo com a reação (3.14):



A reatividade é o fator determinante da característica do carvão vegetal como redutor. Maior reatividade implica em maior cinética da combustão e maior geração de gás redutor da carga metálica (CO) <sup>[8]</sup>. Isto é importante para ICP, caso esta propriedade possa ser extrapolada para a combustibilidade (que seria relacionada a oxidação do carbono pelo oxigênio), pois o tempo de permanência da partícula de carvão vegetal na zona de combustão é extremamente pequeno, cerca de 20ms.

### ***Umidade***

O carvão vegetal é altamente higroscópico (propriedade que certos materiais têm de absorver água<sup>11</sup>). A água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno e no caso da ICP provoca perda de calor, aumentando o consumo específico de carbono e

---

<sup>9</sup> Conceito retirado do site <http://www.engefiltro.com.br/glossario.htm#Porosidade>, no dia 15/01/2008.

<sup>10</sup> Conceito do site <http://www.lepten.ufsc.br/disciplinas/emc5416/aulas/aula02.pdf>, no dia 15/01/2008.

<sup>11</sup> Conceito do site <http://pt.wikipedia.org/wiki/Higroscopia>, no dia 15/01/2008.

diminuindo a resistência do carvão vegetal<sup>[8]</sup> e particularmente para os sistemas de injeção induz a entupimento dos vasos de transporte de carvão pulverizado para ventaneiras.

### ***Resistência mecânica***

Esta propriedade se difere quando se compara a sua utilização em alto-forno e ICP. No caso da ICP seria importante o carvão ter baixa resistência mecânica, ao contrário do que ocorre para o carvão vegetal enornado pelo topo do alto-forno. Isto porque, a granulometria trabalhada para injeção normalmente é de 80 % < 200mesh (ou 0,074µm), então é preciso que a moinha (carvão fino) passe por um processo de cominuição antes da sua injeção no alto-forno. Neste caso, seria importante a baixa resistência mecânica para um melhor rendimento de moagem. Existe um parâmetro que indica esta resistência mecânica, que é o HGI (Hardgrove Grindability Index)<sup>12</sup>. Quanto maior o HGI, mais macio é o carvão, portanto maior será a produtividade do moinho.

### ***Granulometria***

Granulometria está relacionada ao tamanho da partícula sendo importante para o alto-forno<sup>[8]</sup> e ICP. A matéria-prima (moinha) deve ter a menor granulometria possível, no caso da ICP. Ou seja, granulometria menor implica em menor tempo de moagem, menor desgaste do moinho (conseqüentemente menor manutenção) e maior rendimento de moagem, isto para um carvão vegetal de mesmo HGI.

### ***Carbono fixo***

O carbono fixo depende da carbonização da madeira e teor de lignina na madeira<sup>[5,10]</sup>, como foi visto no item 3.2. Quanto maior a quantidade de carbono fixo maior será o índice de combustão (item 3.3.4) da partícula na ICP. A taxa de substituição (item 3.3.4) será maior com o aumento do carbono fixo na partícula.

### ***Materiais Voláteis***

São substâncias formadas pelos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio. Sua quantidade é influenciada pela lignina, estrutura da madeira e carbonização<sup>[5,6,8 e 10]</sup>, como foi visto no item 3.2. Um aumento de materiais voláteis acarreta abaixamento no percentual de carbono fixo. A reatividade é influenciada diretamente na quantidade de

---

<sup>12</sup> O índice de moabilidade do carvão utilizando o ensaio de Hardgrove é normalizado pela NBR 8739.

material volátil do carvão vegetal. Durante o processo de combustão do carvão no interior do “raceway”, verifica-se que maiores porcentagens de materiais voláteis, no carvão, aumentam a reatividade do mesmo para o carvão mineral (item 3.3.4). No caso do carvão vegetal um aumento no carbono fixo acarretará um aumento da reatividade.

### ***Cinzas***

Quanto ao teor de cinzas, um dos aspectos mais importantes está relacionado com sua composição. Os componentes das cinzas são P, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O. A composição química das cinzas varia de árvore para árvore e de galho para tronco. Elevado teor de cinzas é prejudicial tanto no alto-forno, quanto na ICP. Nos dois casos as cinzas consomem calor e ocupa volume dentro da partícula e do alto-forno. Normalmente, quanto maior o teor de cinzas, menor será o índice de combustão e a taxa de substituição, quando se pratica a ICP<sup>[1, 9 e 11]</sup>.

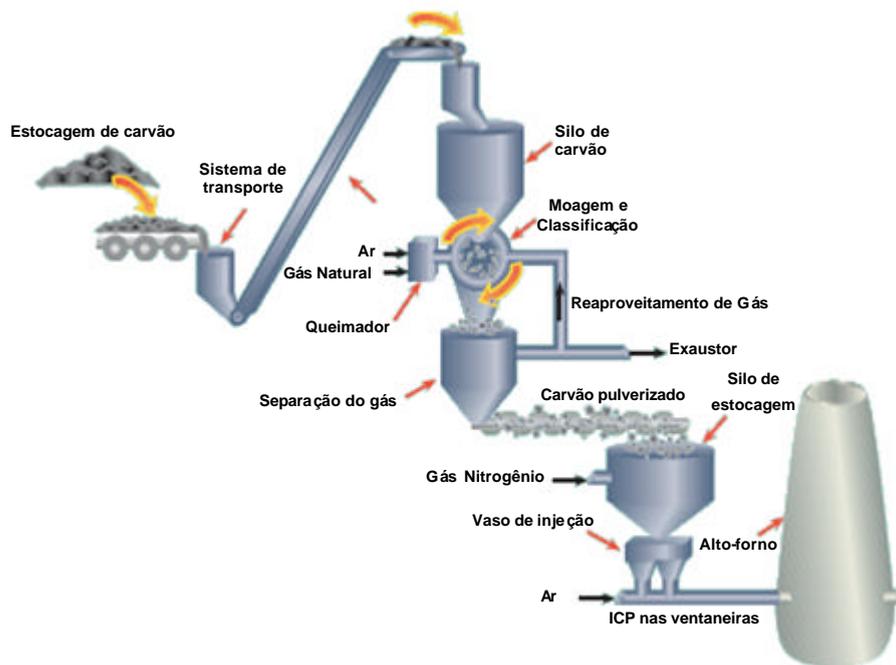
### **3.3 Injeção de carvão pulverizado em alto-forno**

As tecnologias para injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras de altos-fornos foram inicialmente desenvolvidas para utilização do carvão mineral. Para o carvão vegetal foram efetuadas experiências em escala piloto na Austrália sem no entanto partir-se para sua utilização industrial. A utilização em escala industrial do primeiro sistema de injeção de carvão vegetal, com sucesso, pode ser creditada a Acesita, no seu alto-forno 2, a partir de 1981<sup>[6]</sup>.

A experiência da Acesita mostrou que os princípios básicos da injeção de carvão mineral se aplicam ao carvão vegetal, existindo, no entanto, algumas diferenças nas propriedades destes dois combustíveis que implicam em algumas modificações em detalhes nas instalações<sup>[6]</sup>.

A substituição de parte do redutor granulado, carregado no topo do alto-forno, por um combustível de mais baixo custo, injetado diretamente pelas ventaneiras, é o objetivo principal da ICP<sup>[1,6]</sup>. Além de redução do custo do redutor, outros fatores irão influenciar direta ou indiretamente a maior economicidade da operação do alto-forno com injeção, tais como o aumento de produtividade, maior estabilidade operacional do reator devido à maior eficácia do seu controle térmico através da injeção<sup>[3]</sup>.

Para ser injetado no alto-forno, o carvão passa por processos que irá adequá-lo, para sua injeção na zona de combustão do alto-forno. Estes processos são a moagem para se atingir a granulometria ideal e secagem para eliminar umidade. Após isto, o carvão é fluidizado através da mistura com um gás, normalmente ar ou nitrogênio, para ser transportado pneumaticamente em tubulações e convenientemente distribuído pelas ventaneiras do alto-forno<sup>[6]</sup>. A figura 3.7 mostra um exemplo de fluxograma de processo de uma ICP.



**Figura 3.7** - Fluxograma de processo de uma instalação de ICP<sup>[11]</sup>.

O carvão é injetado no alto-forno através das ventaneiras, no mesmo duto onde é injetado o ar quente. Dentro ainda da *faceway*, ele sofre desvolatilização e queima, gerando calor e gases. O calor gerado aquece a carga metálica e os gases (CO e H<sub>2</sub>), formados na combustão do carvão, servirão para reduzir a carga metálica. Na figura 3.8 tem-se um desenho esquemático de uma ventaneira, com o tubo de injeção de carvão pulverizado.



**Figura 3.8** – Figura esquemática de injeção de carvão pulverizado em alto-forno através das ventaneiras<sup>[11]</sup>.

No presente trabalho é apresentado uma visão geral do processo de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos, procurando-se enfatizar as diversas peculiaridades relativas a injeção de carvão vegetal.

### 3.3.1 Cronologia histórica

Tem-se a seguinte cronologia para a ICP de acordo com a tabela III.6.

**Tabela III.6** - Cronologia mundial da injeção de carvão pulverizado<sup>[1]</sup>.

<b>Data / Período</b>	<b>Fato Ocorrido</b>
<b>1831</b>	Patente inglesa para ICP, conforme figura 3.9 (parte superior)
<b>1840 – 1845</b>	Experiências com ICP na França
<b>1877</b>	Patente alemã, conforme figura 3.9 (parte inferior)
<b>1910 – 1920</b>	Experiência com transporte pneumático e injeção, mas com resultados limitados devido a equipamento.
<b>Década de 1940</b>	Injeção na Rússia, aplicada a fabricação de ferro-silício
<b>1948 – 1955</b>	Experiência na Usina de DZERZINSKY, RÚSSIA
<b>1959</b>	Experiências com ICP, em alto-forno piloto, foram conduzidas pelo US Bureau of Mines
<b>1961</b>	Idem em Buffalo, EUA
<b>1959 – 1961</b>	Experiências no alto-forno de La Chasse, França
<b>1963</b>	A Weirton Steel CO, EUA iniciou a ICP em seu alto-forno nº4, com tecnologia da Koppers Company Inc. EUA
<b>1965</b>	Sistema desenvolvido pela Petrocarb, EUA em funcionamento nos altos-fornos de Buffalo, EUA e Stanton, Inglaterra. Havia injeção similar no alto-forno de Louvroil, França
<b>1967</b>	Injeção é incorporada, definitivamente, à rotina operacional do alto-forno de Bellefonte, <u>Ashland</u> , Kentucky, EUA da Armco Steel Co. A partir deste evento, considera-se como dominada a aplicação industrial da ICP

A despeito da tecnologia de injeção de materiais sólidos em altos-fornos ter sido considerada como dominada ainda nos idos de 1967, somente a partir do início da década de 1980, é que houve um crescimento marcante nas unidades de injeção de carvão pulverizado no mundo. Isto foi motivado pelos aumentos sucessivos que aconteceram tanto em 1973, quanto em 1979, quando o preço do barril do petróleo subiu de 3 para 36 USD, motivando de vez a eliminação das unidades de injeção de óleo combustível em altos-fornos. No mês de novembro de 2007, este valor atingiu USD 100 o BEP (Barril Equivalente de Petróleo), com alguns picos superiores a USD 100 o BEP em fevereiro de 2008.

No Brasil, os fatos marcantes relativos à ICP são mostrados na tabela III.7. Deve ser salientado que a despeito do país depender exclusivamente de fontes externas de carvão mineral coqueificável, foi uma empresa genuinamente nacional, na época a Acesita, que

trabalhava somente com o carvão vegetal como termo-redutor que deslanchou, na época, o único sistema nacional de injeção de carvão pelas ventaneiras de altos-fornos<sup>[1]</sup>. Aliás, sistema totalmente desenvolvido por técnicos brasileiros. Na verdade os primeiros estudos de aproveitamento de finos de carvão para injeção datam dos idos de 1969 pelo Eng. Renato Zauli Machado.

**Tabela III.7 - Cronologia brasileira da injeção de carvão pulverizado<sup>[1]</sup>.**

<b>Data / Período</b>	<b>Fato Ocorrido</b>
<b>1976 (Outubro)</b>	Término do estudo de viabilidade técnico-econômica e decisão da diretoria da ACESITA em implantar ICP
<b>1980</b>	A ACESITA inicia testes em instalação piloto
<b>1981</b>	Testes com ICP no alto-forno 2 da ACESITA
<b>1982</b>	A ICP é incorporada, definitivamente, à prática operacional do alto-forno 2 da ACESITA
<b>1986</b>	ICP, no alto-forno 1 da ACESITA
<b>1989</b>	ICP, na Pains; com instalação provisória
<b>1990</b>	Início da ICP no alto-forno 1 da Mannesmann (1º/agosto/90)
<b>1990</b>	ICP, na Pains, com instalação definitiva, nos três altos-fornos (novembro). Pains é atualmente a Gerdau, em Divinópolis.
<b>1993</b>	Início da ICP na USIMINAS; (AF – 1 = 01/mar/93; AF-2= 11/jan/93; AF-3= 26/fev/93) agosto – início da ICP no alto-forno 3 na Belgo Mineira
<b>1995</b>	Implantação da ICP no alto-forno 2 da Mannesmann
<b>A partir de 1995</b>	Açominas (Ouro Branco); CST (Serra); CSN (Volta Redonda)
<b>1996</b>	Início da ICP na COSIPA (carvão mineral); Viena (carvão vegetal) <b>1ª usina dos PIG a implantar o sistema.</b>
<b>A partir de 2002</b>	CISAM (Carvão vegetal); CBF, Sidersa, CISAM e Calsete, Plantar, COSIPAR, Gusa Nordeste

Atualmente mais de 350 altos-fornos no mundo injetam carvão pulverizado, conforme pode ser visto na figura 3.10. A tabela III.8 mostra a distribuição destes altos-fornos no mundo.

**Tabela III.8** - Distribuição geográfica dos altos-fornos com ICP. Status: 2007<sup>[1]</sup>.

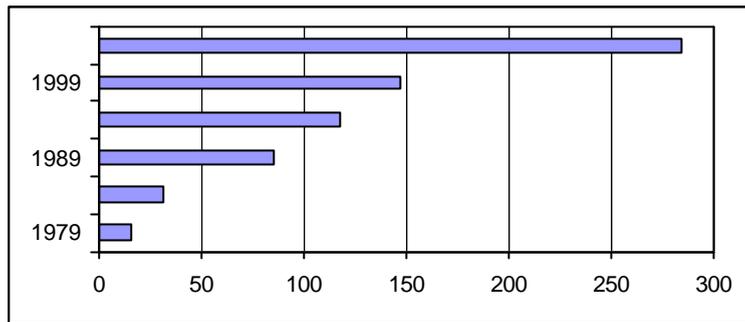
País/Região	Número de Altos-Fornos com ICP
EUA	14
Japão	30
China	82
Coréia	5
Taiwan	3
Índia	16
Rússia	22
Europa	52
Outros	10
Brasil	31*

\* Inclui todos altos-fornos com ICP no Brasil até 2007, incluindo todos os altos-fornos a carvão vegetal de baixa capacidade ( $P < 500$  t/dia).



**Figura 3.9** - Primeira patente inglesa e alemã para ICP<sup>13</sup> [1].

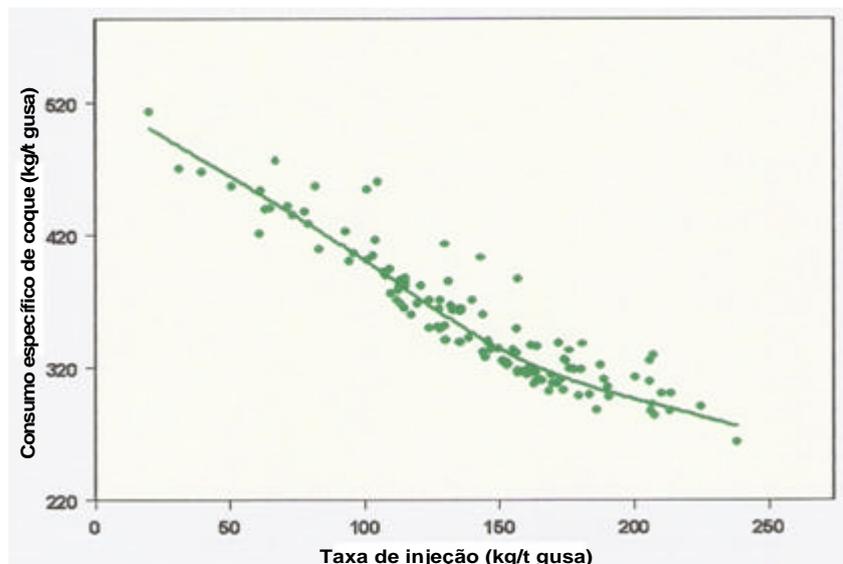
<sup>13</sup> Tradução *do Inglês*: Introdução de certos materiais na parte inferior de altos-fornos ou cubilots para fabricar uma grande quantidade de ferro de qualidade superior com menor consumo de combustível e com materiais de menor custo. *Do alemão*: Aparelho para injeção de substâncias sólidas com um soprador de ar em um alto-forno.



**Figura 3.10** - Evolução histórica de altos-fornos operados mundialmente com injeção de carvão pulverizado <sup>[1]</sup>.

### 3.3.2 Objetivo e Vantagens

O objetivo da ICP é a economia no desembolso de combustível e redutor, ou seja, a redução do custo de gusa. Outras vantagens advêm da ICP, mas não se deve perder o foco de sua implantação - economia de redutor<sup>[1,2,3 e 6]</sup>. A figura 3.11 apresenta a variação da relação entre a taxa de injeção com o consumo de “coke rate” dos altos-fornos do mundo inteiro. Nesta figura observa-se que a partir de um determinado valor, em torno de 150 kg/t gusa existe um arrefecimento na redução do consumo de coque. Isto inclusive explica porque algumas empresas que possuem altos-fornos a coque limitam a taxa de ICP nestes valores.



**Figura 3.11** – Consumo específico de carvão injetado relacionado ao consumo específico de coque<sup>[14]</sup>. Ano de referência: 2001

A substituição de parte do carvão vegetal (ou coque) pelo ICP pode desempenhar duas das três funções básicas do carvão vegetal, que são prover uma fonte de calor e servir como fonte de gás redutor. A ICP não pode prover um leito permeável no alto-forno, como no caso do carvão vegetal ou coque. Aliás, ela atua exatamente no sentido contrário. Em síntese os seguintes benefícios são derivados do emprego da tecnologia de ICP em altos-fornos<sup>[1,3]</sup>:

- Redução de custos pela substituição do coque por carvões não-coqueificáveis e do carvão vegetal por moinha de baixo custo, devendo reduzir o custo energético dependendo do material injetado e mudanças operacionais;
- Elevação de produtividade devido ao uso de enriquecimento do ar soprado com oxigênio;
- Menor desmatamento, no caso de AF a carvão vegetal, e geração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, pois, estar-se-á diminuindo o consumo de carvão vegetal;
- Preservação de reservas de carvão mineral coqueificável, no caso de AF a coque, com a utilização de carvão não-coqueificável para ICP;
- Diminuição na degradação ambiental por causa da otimização de consumo energético;
- Maior estabilidade de qualidade de gusa e redução do teor de silício.

Para que essas vantagens listadas acima aconteçam é preciso que mudanças na operação, distribuição de carga e qualidade de matérias-primas aconteçam a favor da ICP<sup>[15]</sup>. Esses fatores serão abordados no item 3.3.4.

A seguir são listadas e exemplificadas as principais vantagens de injeção de carvão pulverizado em alto-forno:

***Caso da injeção de carvão mineral pulverizado, em alto-forno a coque:***

1° - A injeção aumenta a vida útil das coquerias. A tabela III.9 ilustra este fato através da redução do número de desenformamentos/dia nas coquerias da USIMINAS<sup>[1]</sup>, ou seja, com ICP diminuirá o coque carregado pelo topo, diminuindo a produção de coque na coqueria provocando menor desgaste dos equipamentos de coqueria, diminuição no investimento em construção de coqueria e reforma da mesma<sup>[1,3]</sup>. Outra vantagem ligada a este fator está relacionada com o meio ambiente, ou seja, na diminuição de produção de gases tóxicos na produção de coque e aquecimento global<sup>[1,3]</sup>;

**Tabela III.9** - Níveis operacionais de coquerias associados a ICP, na USIMINAS<sup>[1]</sup>.

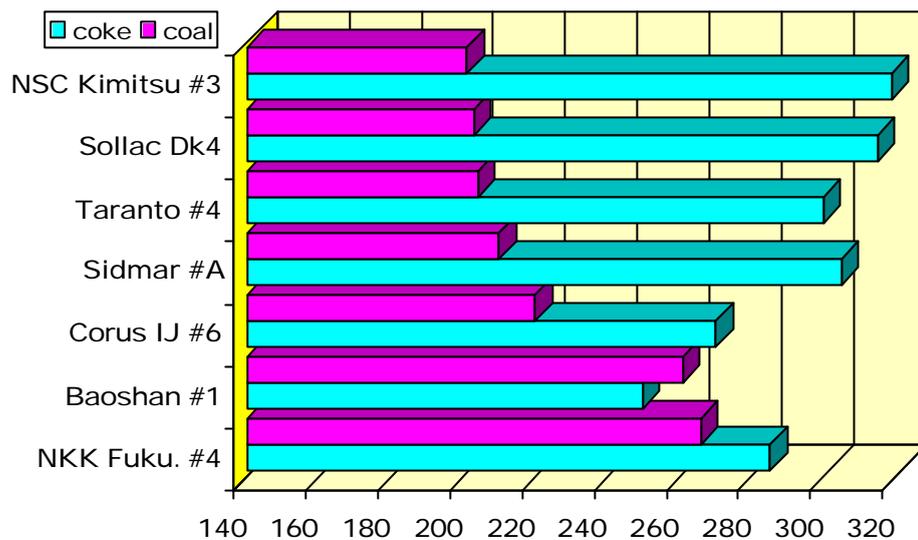
Desenformamento/dia		Injeção carvão AF's 1,2 e 3 (kg/t)	Injeção somente no AF 3 (kg/t)	Déficit de coque anual ( t )
Coqueria 2	Coqueria 1			
150	148,5	-	-	102.200
150	148,5	17	26	-
150	143,0	30	47	-
150	137,5	43	68	-
140	137,5	55	86	-
140	132,0	68	107	-

Uma tonelada de coque obtida em uma coqueria nova custa 250 USD/t, enquanto que uma tonelada de carvão pulverizado custa em tomo de 70 USD/t (Base: 1998).

Para uma taxa de substituição de 0,85 (para cada kg de carvão injetado economiza-se 0,85kg de carvão do topo), a ICP leva a uma economia de cerca de 168 USD/t, em relação ao coque (Base: 1998)<sup>[1]</sup>. Neste caso, para as empresas que possuam déficit de coque é vantajoso, economicamente, adquirir carvão e prepará-lo para a injeção em relação à aquisição de coque. Atualmente estes valores podem inclusive ser superiores, gerando inclusive maiores ganhos econômicos com a pratica de ICP. Algumas fontes revelam que o preço do coque importado em janeiro de 2008 atingiu 440 USD a tonelada de coque.

2° - Com a ICP podem-se utilizar carvões de baixo custo e não coqueificáveis, com teores de cinza de até 18%<sup>[1]</sup>.

3° - O efeito combinado da injeção de carvão, aumento da relação minério/coque, supressão do vapor injetado, enriquecimento de oxigênio leva a uma diminuição do consumo específico de coque e aumento da produtividade<sup>[1,15]</sup>. A Figura 3.12 mostra récordes mensais de ICP em altos-fornos no mundo. Esses índices, de taxas de injeção e de consumo de coque, representam ganhos substanciais para empresa. A usina de Baoshan, alto-forno 1 possui o recorde mensal obtido no mundo. Obteve-se em um mês de operação, taxas específicas de injeção superiores ao consumo específico de coque pelo topo (“coke-rate”).



[Coal: carvão mineral. Coke: coque]

**Figura 3.12** - Taxas de injeção (kg/t de gusa) e “*coke-rate*” (kg/t de gusa), valores médios mensais, obtidos em algumas usinas siderúrgicas no mundo<sup>[1]</sup>.

4° - Melhoria da qualidade do coque e aproveitamento mais racional das reservas do carvão mineral. Esta é indiscutivelmente uma das maiores vantagens ambientais e econômicas da ICP de carvão mineral<sup>[1,15]</sup>.

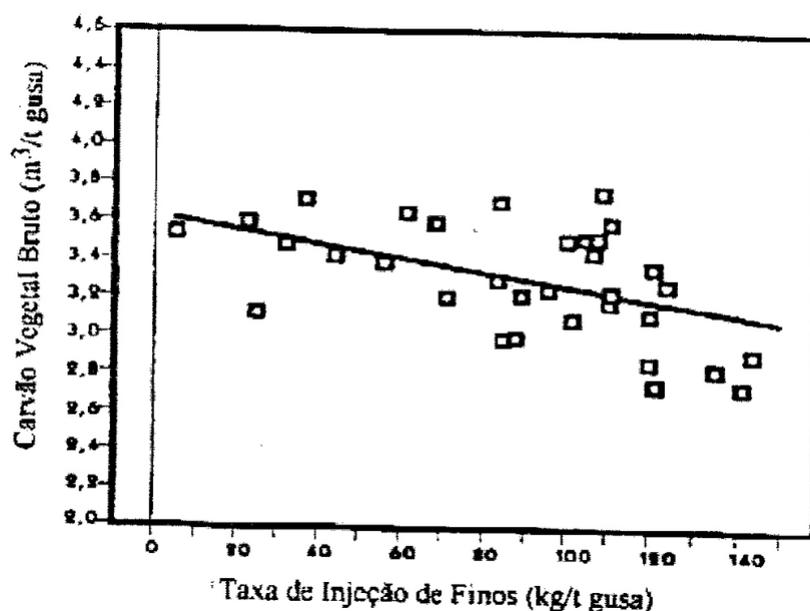
***Caso da injeção de carvão vegetal pulverizado, em alto-forno a carvão vegetal:***

1° - Aproveitamento integral do carvão vegetal dado que, do carvão recebido nas usinas siderúrgicas, até 25% constitui-se de finos (< 9,52mm), sob o ponto de vista granulométrico inadequado para a utilização nos altos-fornos<sup>[6]</sup> conforme ilustra a figura 3.16. A compra deste carvão vegetal na maioria das empresas é feita por volume e o fino de carvão vem junto, nos interstícios do carvão vegetal granulado<sup>[6]</sup>. Desta forma o fino chega à usina sem custo. Mesmo que não o seja, o valor comercial dos finos (em peso) é da ordem de 20% do carvão bruto. Economicamente isto é de grande importância no custo final de ICP e influencia positivamente na economia de produção do ferro gusa.

2° – Durante o manuseio do carvão vegetal na usina siderúrgica gera-se poluição por partículas sólidas. Para evitar contaminação atmosférica, utiliza-se um sistema de desempoeiramento. Os finos captados neste equipamento constituem matérias-primas

para injeção nos altos-fornos. O pó de desempoeiramento apresenta granulometria dentro da faixa de injeção (normalmente 80 % < 0,074mm), não precisando com isto da etapa de moagem<sup>[1]</sup>. Utilizando com isto um material poluente e de baixo custo de processamento para ICP. A primeira empresa a usar esta técnica foi a Mannesmann ainda nos idos da década de 80. A sua instalação piloto de ICP, construída em 1984, usava apenas pó exaurido do desempoeiramento.

3° – A figura 3.13 mostra a relação entre consumo de carvão vegetal bruto e a taxa de injeção para o alto-forno 1 Vallourec & Mannesmann Tubes. Verifica-se uma economia de 0,4 a 0,5m<sup>3</sup>/t gusa de carvão vegetal bruto para injeção no nível de 150kg/t gusa<sup>[1]</sup>. Importante salientar que os fatores que provocam a economia de redutor são idênticos aos citados para injeção de carvão mineral pulverizado.



**Figura 3.13** - Influência da injeção de carvão vegetal bruto do alto-forno 1 Vallourec & Mannesmann Tubes<sup>[1]</sup>.

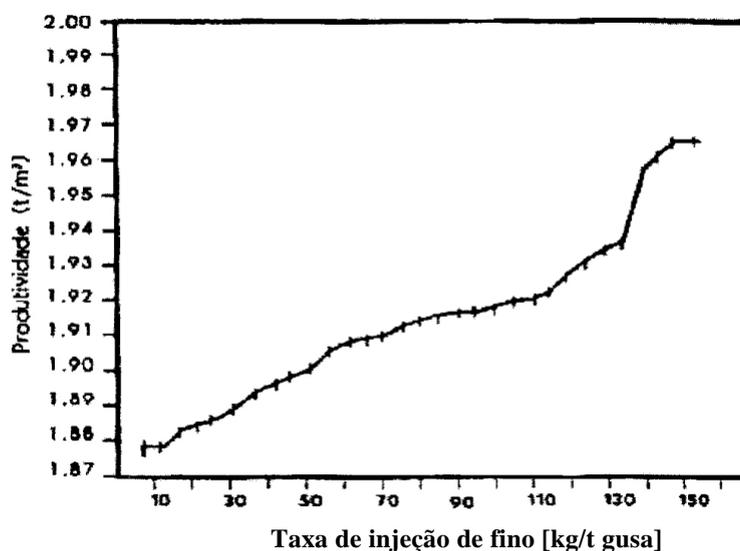
A ICP implica em menor consumo de carvão vegetal bruto, diminuindo o consumo anual de carvão. Como a legislação previa para 2005, 100% de carvão vegetal oriundo de reflorestamento, a ICP torna-se imperiosa, com isto menor necessidade de reflorestamento e desmatamento (para aqueles casos onde ainda se usa carvão de mata nativa).

4° - Em relação ao aumento de produtividade tem-se como exemplo o caso do alto-forno 2 da Acesita, como mostra a tabela III.10. Foram dados médios extraídos da empresa, para consubstanciar o efeito da ICP sobre a produtividade, bem como o consumo de redutor. Deve ser mencionado que melhoria na carga metálica contribuiu para os melhores índices além da ICP. Portanto, não foi o efeito isolado da ICP que promoveu os ganhos mostrados.

**Tabela III.10** - Dados de produtividade e taxa de injeção com e sem ICP da Acesita<sup>[1]</sup>.

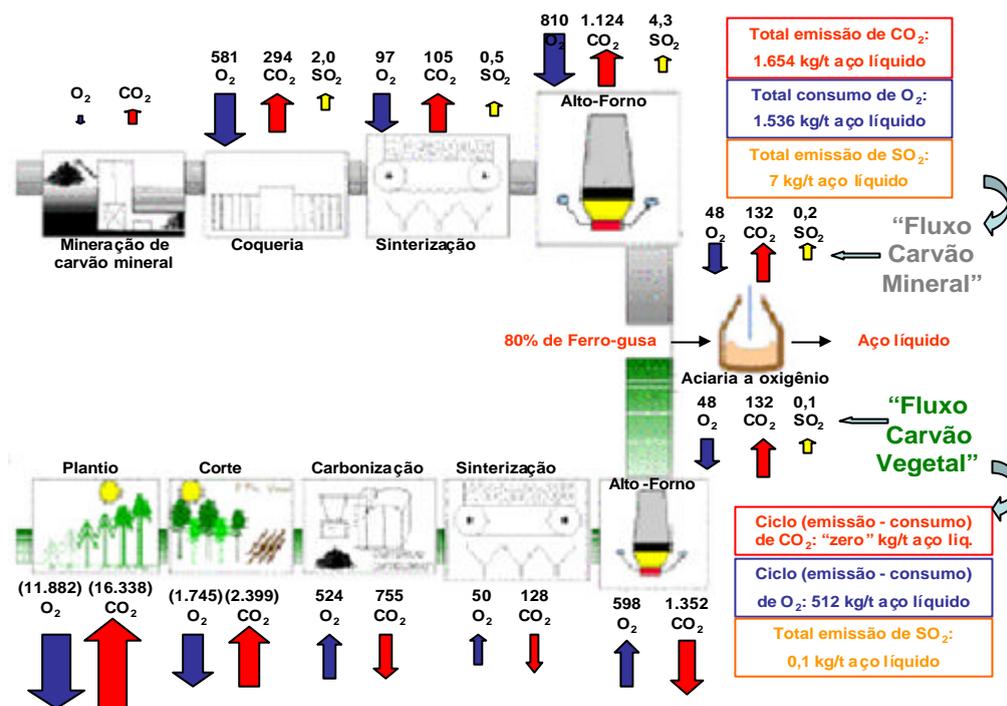
Condição	Produtividade (t/d/m <sup>3</sup> útil)	Consumo carbono topo (kg/t)	Taxa de injeção (kg/t)
Sem ICP	1,49	532	0
Com ICP	2,09	376	104

A figura 3.14 mostra a influência da injeção de finos na produtividade do alto-forno da Vallourec & Mannesmann Tubes. Também neste caso o ganho de produtividade não pode ser creditado a ICP, visto que alterações na distribuição de carga, implantação de placas defletoras, alteração da composição da carga metálica, entre outros foram fatores decisivos neste aumento observado.



**Figura 3.14** - Influência da ICP na produtividade do alto-forno 1 da Vallourec & Mannesmann Tubes<sup>[1]</sup>.

5° - O balanço de CO<sub>2</sub>, do alto-forno a carvão vegetal é positivo. O CO<sub>2</sub> liberado pelo alto-forno para a atmosfera é menor do que o absorvido anteriormente pela floresta (reflorestamento)<sup>[7,15 e 49]</sup>, como pode ser visto na figura 3.15. Observe que o balanço de CO<sub>2</sub> para a rota de coque é negativo, ou seja, liberação de gás na atmosfera.



**Figura 3.15** – Fluxograma de emissão de gases de produção de aço líquido pela rota de coque e carvão vegetal<sup>[7]</sup>.

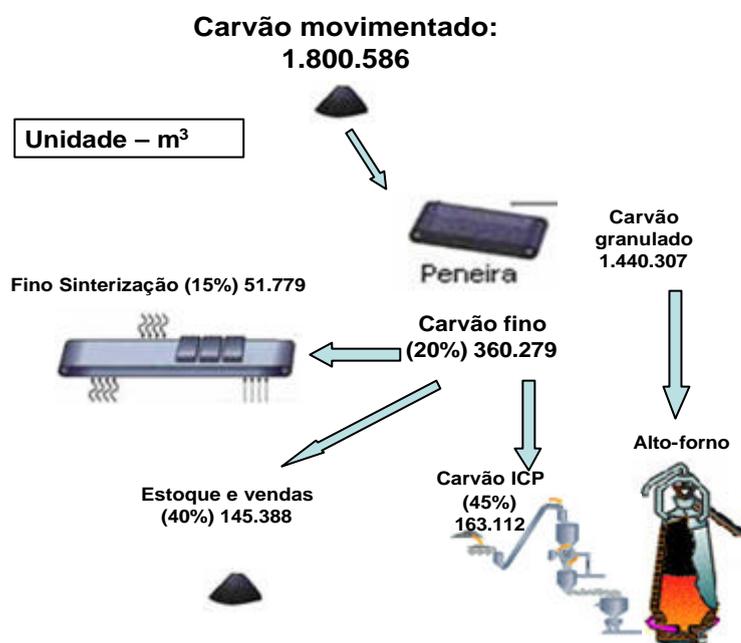
A moínha de carvão vegetal depositada pode trazer prejuízos ambientais como contaminação e incêndio. Por causa do seu ponto de ignição baixo (em torno de 195°C)<sup>[18]</sup>. O carvão é considerado como combustível de combustão espontânea<sup>[6]</sup>.

### 3.3.3 Contexto da ICP nas Usinas Siderúrgicas

A injeção de carvão seja em altos-fornos a carvão vegetal (ou a coque) situa-se dentro de casos específicos, de acordo com o fluxo de redutor na usina, conforme será visto a seguir.

### ***I - Usina integrada a carvão vegetal, com sinterização:***

As empresas brasileiras, que se encontram neste caso, dividem o fino de carvão vegetal em duas rotas; ICP e Sinterização. No caso da Belgo Mineira, quando utilizava carvão vegetal, a porção abaixo de 0,5mm seguia para ICP e o restante para sinterização. Melhorando assim a eficiência da sinterização e da ICP<sup>[1,6]</sup>. Esta faixa granulométrica poderia ser usada diretamente na ICP sem necessidade de moagem<sup>[18]</sup>, diminuindo custo operacional. Na figura 3.16, tem-se um exemplo de balanço de finos na Acesita, quando havia ICP somente no alto-forno 2, com sinterização. Atualmente todos finos gerados no peneiramento são usados na ICP para a sua injeção nos dois altos-fornos da Acesita.



**Figura 3.16** - Distribuição esquemática do carvão vegetal na Acesita com ICP somente no alto-forno 2 (nesta época, a empresa possuía Sinterização).

Adaptado de <sup>[1]</sup>.

### ***II - Usina integrada a carvão vegetal, sem sinterização:***

O carvão vegetal, neste caso, iria todo para a ICP. Esta quantidade pode alcançar 25% do carvão total, analisando desde a carvoaria até seu consumo no Alto-forno<sup>[6]</sup>. Neste caso, as empresas também classificam este carvão com intuito de diminuir custos de moagem para utilização na ICP.

### ***III - Pó de carvão do sistema de desempoeiramento***

O manuseio de carvão vegetal nas usinas siderúrgicas gera poluição por partículas sólidas levando a instalação de equipamentos para desempoeiramento. Os finos captados nestes equipamentos constituem matérias-primas para injeção nos altos-fornos. A Mannesmann (atual V&M Tubes) na década de 80 foi pioneira no aproveitamento destes finos em alto-forno comercial. A vantagem do pó de desempoeiramento sobre os finos de carvão está no rendimento de moagem de 100%<sup>[1]</sup>, por causa da sua granulometria fina. O maior inconveniente deste material é o baixo percentual de carbono fixo, em virtude da contaminação por outros materiais. O valor correspondente do pó exaurido para o incremento da injeção normalmente representa cerca de 15kg/t gusa<sup>[1]</sup>.

### ***IV - Usinas não-integradas, caso dos PIG:***

As usinas não-integradas ou chamadas de produtoras independentes de gusa (PIG) possuem características diferenciadas das usinas integradas a coque e carvão vegetal. Essas características são fatores importantes para a injeção de carvão pulverizado em alto-forno<sup>[1]</sup>:

- Uso de 100% de minério de ferro granulado;
- Temperatura de sopro é limitada a  $T < 900^{\circ}\text{C}$ , isto por causa da utilização de ‘glendon’ para aquecimento do ar injetado;

As usinas não integradas que possuem ICP nos seus altos-fornos não conseguem obter o mesmo rendimento de taxa de injeção que as outras. A taxa de injeção dos PIG está em torno de 60 a 80 kg/t gusa, enquanto que as usinas integradas estão com taxas de injeção acima de 140kg/t gusa<sup>14</sup>. Esta distância de taxa de injeção reflete nos números de empresas do setor PIG que possuem instalações de ICP, em torno de 15%<sup>[1]</sup>. Certamente, este número deve aumentar bastante nos próximos anos, em função dos ganhos econômicos da injeção de carvão pulverizado (mesmo considerando as baixas taxas de injeção praticada, ainda é positivo) e apoiado por desenvolvimentos tecnológicos.

---

<sup>14</sup> Contatos pessoais com técnicos dos PIG e setor a coque, em setembro de 2006, seminário nacional realizado em Ouro Preto, organizado pela ABM.

### ***V - Usinas integradas a coque:***

No Brasil todos os altos-fornos a coque possuem instalações de ICP. Isto mostra a importância desta operação na fabricação de ferro gusa. As principais vantagens da injeção de carvão nestes altos-fornos estão listadas a seguir <sup>[17]</sup>:

- Para empresas que possuem *déficit* de coque é vantajoso economicamente adquirir carvão e prepará-lo para a injeção, quando comparado à aquisição do coque.
- A injeção de carvão aumenta a vida útil das coquearias.
- A injeção elimina o investimento em coqueria para empresas que pretendem aumentar a produção de ferro gusa.
- Com a injeção de carvão, podem-se utilizar carvões de baixo custo, visto que ele não necessita ter propriedades coqueificantes.
- Redução no consumo específico de coque.
- Melhora na qualidade do coque e aproveitamento mais racional das reservas do carvão mineral.

Devido ao seu efeito refrigerante, a injeção de carvão leva a uma diminuição da temperatura de chama no alto-forno e para mantê-la nos níveis normais é necessário aumentar a temperatura de sopro, reduzir a injeção de vapor ou enriquecer o ar soprado com oxigênio. A decisão fica condicionada ao custo de cada insumo no processo de produção do ferro gusa<sup>[17]</sup>. Outro fator importante está ligado distribuição e qualidade da carga enfiada no alto-forno, esses parâmetros devem ser modificados para uma melhor eficiência da ICP, diminuindo mesmo com isto o custo final de produção de ferro gusa.

### **3.3.4 Conceitos, Princípios e Efeitos**

A operação de ICP consiste em injetar carvão pulverizado pelas ventaneiras do alto-forno. Este carvão sofrerá combustão gerando gases e calor. Os gases produzidos, CO e H<sub>2</sub>, participam da redução da carga metálica, provocando com isto, a diminuição de combustível pelo topo do alto-forno. Essa prática também favorece o aumento de produtividade e qualidade de gusa. Em termos de produtividade, a diminuição de combustível pelo topo implica em aumento do volume de carga metálica no alto-forno. No caso da qualidade do ferro gusa esta prática diminui elementos nocivos ao aço (Enxofre) como também estabiliza termicamente o alto-forno<sup>[1,3 e 6]</sup>.

Para que isto aconteça, algumas mudanças nos parâmetros operacionais do alto-forno se fazem necessários. Pois com a ICP parâmetros termodinâmicos, físicos e químicos do alto-forno são modificados e para que isto não influencie negativamente, estes devem ser alterados. Neste capítulo serão abordados os fenômenos, efeitos e suas correções<sup>[1,3,6]</sup>.

### ***I - Variáveis Operacionais de ICP***

As principais variáveis operacionais e de ensaios de ICP são aqui abordadas, sendo:

*Taxa de Injeção de Carvão - TIP (kg/t)*

Quantidade de carvão injetada correspondente a uma tonelada de gusa; é calculada ou objetivada.

*Taxa de Injeção Horária - TIH (kg/h)*

Quantidade de carvão injetada em uma hora; é o valor medido. Deve ser observada uma relação entre TIP e TIH.

$$TIH = \text{Prod. TIP} \quad (3.15)$$

Sendo Prod.: produção em t gusa/h.

Pode-se calcular "Prod" através do número de cargas ou da vazão específica do ar:

$$\text{Prod} = \frac{VS}{CEA} \quad (3.16)$$

VS = Vazão de ar soprado, Nm<sup>3</sup>/h

CEA = Consumo específico de ar, Nm<sup>3</sup>/t.

Tem-se:

$$TIH = \frac{VS * TIP}{CEA} \quad (3.17)$$

*Taxa de Substituição - (adimensional)*

Mede a eficiência da ICP

$$s = \frac{CECR - CECA}{TIP} \quad (3.18)$$

CECR = consumo específico de redutor de referência, sem ICP, em kg/t (via topo)

CECA = consumo específico de redutor, com ICP, em kg/t (via topo)

TIP = taxa de injeção, em kg/t

O principal problema no cálculo do  $s$  está na fixação de CECR, o que depende de alto-forno com operação estável. O valor de  $s$  pode se referir ao redutor úmido, seco ou a carbono.

*Taxa de Utilização de Carbono – TUCI (%)*

Representa a participação da ICP no consumo total de carbono fixo.

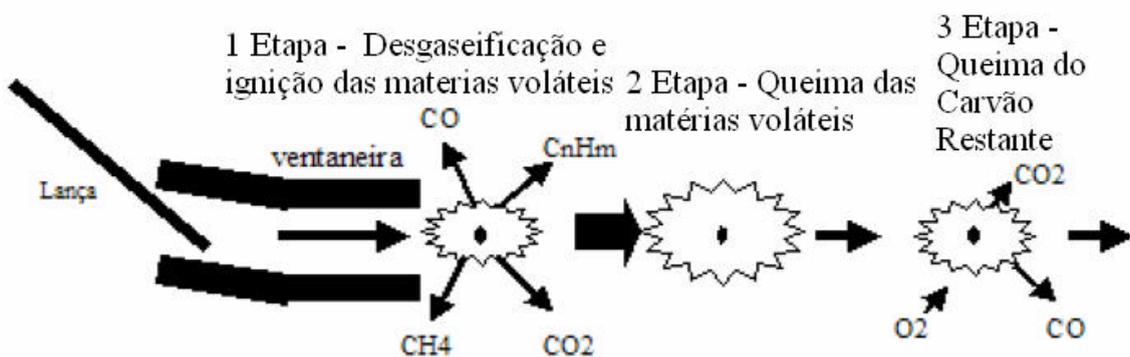
$$TUCI = \frac{CECBI}{CECBT} \cdot 100 \quad (3.19)$$

CECBI = Consumo específico de carbono fixo via ICP, kg/t;

CECBT = Consumo específico de carbono fixo total, kg/t.

## ***II - Princípio da Cinética de Combustão de Carvão Injetado:***

O entendimento dos fenômenos que ocorrem no processo de queima do carvão injetado no alto-forno parte do estudo do comportamento de uma partícula individual do carvão nas ventaneiras<sup>[1,19 e 21]</sup>, conforme mostra a figura 3.17.



**Figura 3.17** – Modelo de combustão da partícula de carvão injetado. Adaptado de <sup>[21]</sup>.

Esses fenômenos são divididos em etapas, ou seja, a combustão de uma partícula de carvão pode ser dividida em três etapas:

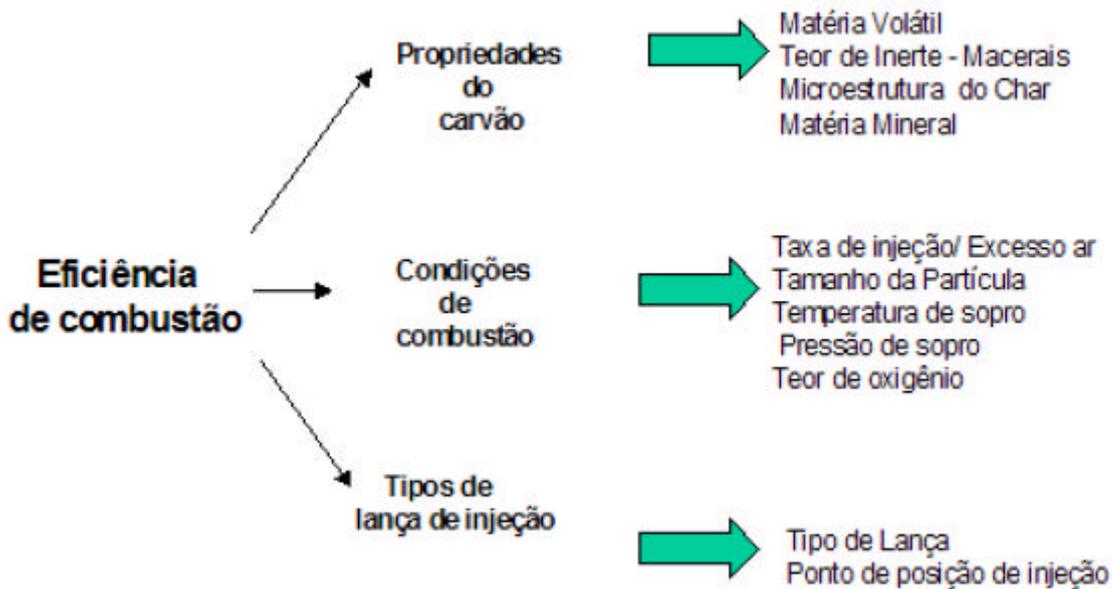
- a) - Aquecimento da partícula provocando a desgaseificação e ignição das matérias voláteis;
- b) – Queima das matérias voláteis;
- c) – Queima do carvão restante (Char);

Essas etapas acontecem na zona de combustão do alto-forno e o tempo de permanência da partícula é extremamente curto, em torno de 20ms, no “*raceway*”. Os fenômenos dessas etapas podem ser descritos da seguinte forma; o aquecimento da partícula é por troca de calor convectivo com o ar do sopro e radiante com a zona de combustão, até que se iniciem as reações da partícula, que são desvolatilização e as reações heterogêneas, que contribuirão para a troca de calor da partícula. A desvolatilização é a pirólise da molécula de carvão, que libera material volátil de alto teor de hidrogênio, deixando um resíduo na partícula que é praticamente carbono, o qual se denomina char<sup>[1,19 e 21]</sup>.

As três etapas mencionadas acima podem ocorrer em seqüência, isoladamente ou simultaneamente. Isto dependerá de parâmetros como tamanho da partícula, composição do carvão, taxa de aquecimento e quantidade de oxigênio disponível para combustão. A predominância será essencialmente da taxa de aquecimento e do tamanho da partícula<sup>[1]</sup>.

- Partículas muito pequenas favorecem o mecanismo de combustão isoladamente que seria a ignição da partícula;
- Partículas de tamanhos elevados há predominância do mecanismo de combustão em seqüência, que envolvem: Ignição e queima dos materiais voláteis, elevação da temperatura e ignição da partícula;
- Taxas de aquecimento muito elevadas favorecem o mecanismo de combustão simultânea que é seria ignição dos materiais voláteis e ignição da partícula juntas.

A figura 3.18 mostra a dependência da eficiência de combustão com as variáveis de processo <sup>[21]</sup>.



**Figura 3.18** - Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo <sup>[21]</sup>.

### **III - Fenômenos dos gases formados pela ICP**

Após a formação dos gases, ou seja, queima do carvão na zona de combustão, bem como a evolução dos voláteis, eles irão interagir com a carga do alto-forno até a sua saída pelo topo através das tubulações do sistema de limpeza. Seu papel é importante dentro do alto-forno promovendo a fonte de calor e servindo como fonte de gás redutor<sup>[1,3 e 15]</sup>.

O capítulo 3.1 mostra as principais reações que ocorrem durante e após a combustão do carvão pulverizado. Os gases “CO” e “H<sub>2</sub>” provindo da combustão do carvão pulverizado, através das reações 3.3 e 3.4, servem como fontes redutoras no alto-forno. Essas substâncias gasosas reduzirão a carga metálica através das reações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.11.

O material volátil do combustível carregado pelo topo é gaseificado antes de chegar às partes inferiores do alto-forno. No caso da ICP, o material volátil do carvão injetado irá gaseificar na zona de combustão provocando um aumento de gás na parte inferior do alto-forno. Provocando mudanças nas zonas internas do alto-forno, aumento de queda de pressão e diminuição de permeabilidade<sup>[1,2 e 3]</sup>. Para que isto não aconteça e torne a técnica de ICP pouco atrativa, mudanças nos parâmetros do alto-forno são necessárias.

#### ***IV - Efeitos da Injeção de Carvão Pulverizado nos parâmetros do Alto-forno***

Os efeitos nos parâmetros do alto-forno pela ICP como permeabilidade, temperatura de chama e distribuição de carga no alto-forno, podem ser contornados conforme se detalha abaixo.

##### *1° - Permeabilidade:*

A permeabilidade é a facilidade ou não dos gases passarem entre a carga do alto-forno. Permeabilidade maior significa facilidade dos gases passarem pela carga, ou seja, os gases não sofrem queda de pressão ao longo do alto-forno. As equações 3.20 e 3.21 exprimem este conceito<sup>[1]</sup>. A primeira equação é usual para altos-fornos a carvão vegetal, sendo a segunda usada em altos-fornos a coque.

$$P_c = V_g / (P_s - P_t) \quad (3.20)$$

$P_c$  = permeabilidade da carga ( $\text{Nm}^3/\text{h.atm}$ );

$V_g$  = volume de gás que atravessa o forno por unidade de tempo ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ );

$P_s$  = pressão do ar no alto-forno (atm);

$P_t$  = pressão do gás no topo do alto-forno (atm).

$$P_s - P_t = [K * (1 - e) * v_g^2] / e^3 \quad (3.21)$$

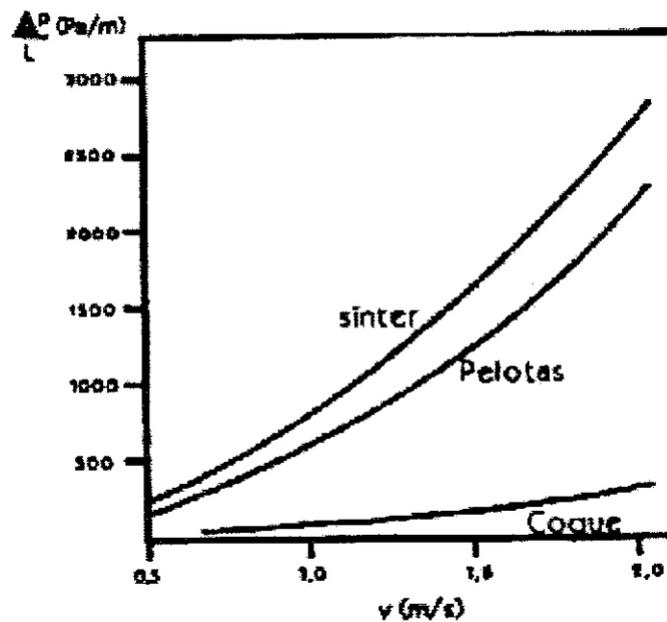
$K$  = constante de permeabilidade ( $\text{atm} * \text{s}^2 / \text{m}^2$ );

$e$  = fração de vazios existentes entre as partículas que compõem a carga;

$v_g$  = velocidade do gás no interior do alto-forno (m/s).

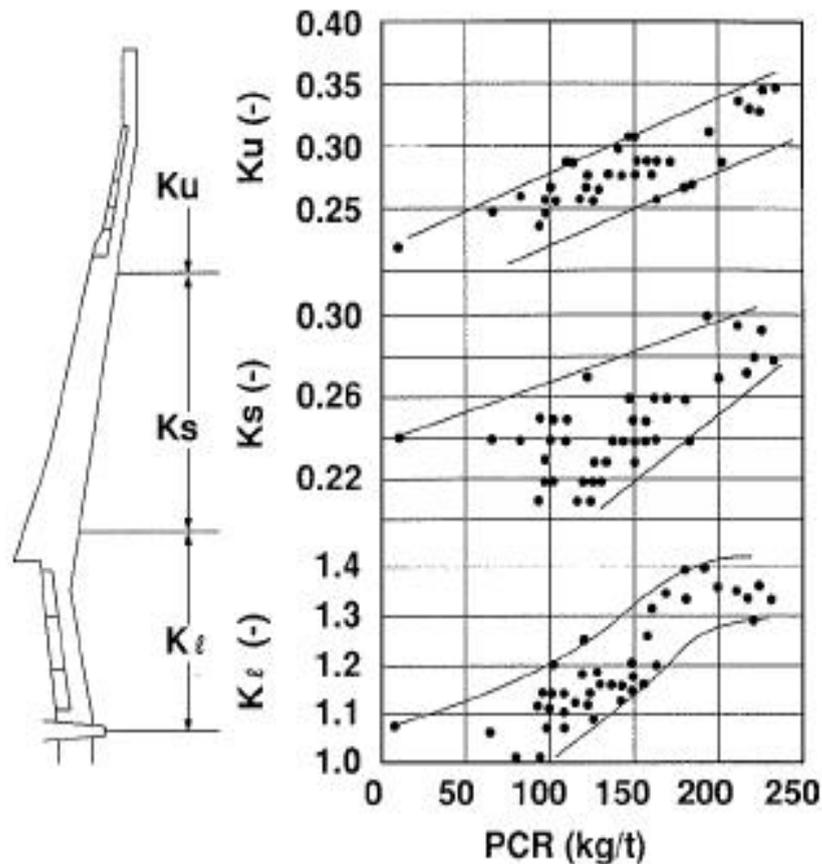
Há dois pontos a serem analisados, são eles, aumento de volume de gases e da relação minério/coque com a ICP. Analisando as equações 3.20 e 3.21, quanto maior é a permeabilidade, maior será  $P_c$  e mais fácil o escoamento dos gases ao longo do alto-forno. Se aumentar o volume dos gases aumentará o  $P_c$ , para a variação de pressão constante. O problema é que a variação de pressão aumenta junto, visto que o caminho da passagem dos gases pela carga continua constante. Este aumento de variação de pressão (queda de pressão) aumenta em escala maior que o aumento do  $v_g$  causando diminuição de  $P_c$ . Em relação ao segundo caso, a substituição do combustível granulado do topo pelo injetado faz com que a relação minério/coque aumente deteriorando a

permeabilidade. O combustível granulado do topo tem como função produzir o meio permeável do alto-forno, pois seu tamanho médio ( $\approx 50\text{mm}$ ) é maior que da carga metálica (12 à 25mm)<sup>[2]</sup> (além é claro de sua menor densidade), provocando maior vazio dentro do alto-forno. A figura 3.19 mostra a queda de pressão ( $\Delta P = P_s - P_t$ ) para as cargas no alto-forno. Ou seja, a variação da perda de carga é muito maior para as cargas metálicas do que o coque, provocando com isto diminuição de permeabilidade, quando se pratica a ICP <sup>[1,21 e 27]</sup>.



**Figura 3.19** – Perda de pressão do gás em camadas de coque, sinter e pelota, dentro das faixas granulométricas industriais <sup>[1]</sup>.

Na figura 3.20 pode-se observar a relação entre a permeabilidade, aqui simbolizada por  $K$  (este termo é usual para altos-fornos a coque), com a taxa de injeção, ao longo do alto-forno. Existe, baseado nesta figura uma diminuição da permeabilidade com aumento da taxa de injeção <sup>[1 e 22]</sup>.



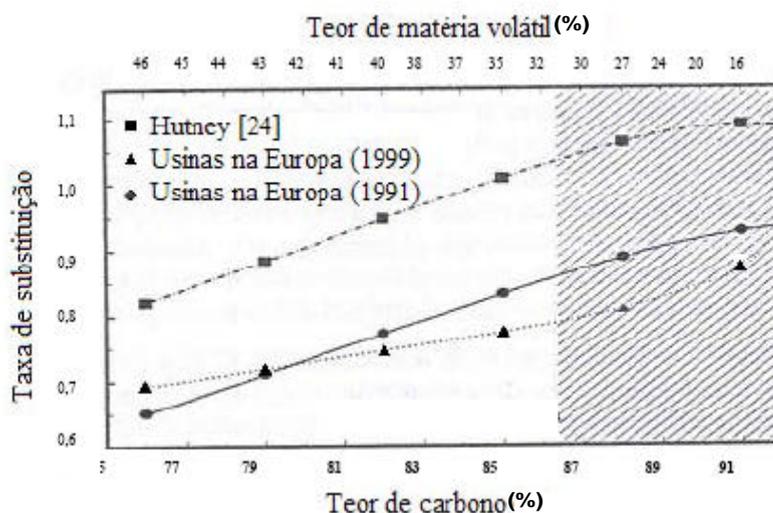
**Figura 3.20** – Relação entre a taxa de injeção de carvão e o índice de permeabilidade no alto-forno<sup>[1 e 22]</sup>. (PCR = PCI; taxa de injeção de carvão pulverizado).

A produção e estabilidade do alto-forno dependem da permeabilidade, como visto no capítulo 3.1. A redução e fusão da carga dentro do alto-forno dependem do contato direto dos gases para que ocorra a transformação em gusa, ou seja, a produção e estabilidade térmica do alto-forno estão ligadas diretamente a permeabilidade. Existem mudanças que podem ser feitas para atenuar essa perda de permeabilidade, sendo que as contramedidas são <sup>[1,22 e 27]</sup>:

- Sistema de peneiramento de carga do alto-forno – As principais medidas são estreitar a faixa granulométrica da carga e aumentar a abertura da peneira (maior tamanho médio da matéria-prima). Evitando com isto que as partículas de menor granulometria alojem entre as de maiores tamanhos dentro do alto-forno, aumentando os vazios, melhorando a permeabilidade.

- Qualidade do carvão injetado – carvão que possua a melhor combustibilidade, menor quantidade de cinzas e materiais voláteis, ou seja, maior concentração de carbono. Importante salientar que estudos mostram que carvões com maiores quantidades de materiais voláteis possuem melhores taxas de combustão, então este fator deve ser levado em consideração no momento da escolha do carvão. As cinzas são compostas de minerais os quais consomem calor durante sua fusão, reações endotérmicas e aumenta o volume de escória prejudicando a permeabilidade do alto-forno<sup>[1,14]</sup>. O carbono é o principal elemento do carvão, através dele haverá a geração de calor e dos gases redutores (CO e H<sub>2</sub>), como mostrado no capítulo 3.1.

A Figura 3.21 mostra o comportamento da taxa de substituição em função do teor em carbono e matéria volátil para os altos-fornos em usinas na Europa e o estudo de Hutney, o qual desenvolveu uma equação de taxa de substituição em função do poder calorífico do material injetado<sup>[19]</sup>.



**Figura 3.21** – Influência do teor de carbono e de matéria volátil na taxa de substituição<sup>[19]</sup>.

- Qualidade da carga de topo do alto-forno – é imprescindível que as propriedades da carga melhorem quando se passa a praticar a ICP. A uniformidade e elevada resistência mecânica são propriedades de combustível e carga metálica necessárias para uma boa taxa de injeção de carvão<sup>[1,15]</sup>. No caso específico da carga metálica, uma boa redutibilidade será fator primordial, pois a redução será feita indiretamente (CO e

H<sub>2</sub>)<sup>[14]</sup>. Na tabela III.11 apresentam-se as propriedades requeridas para cargas metálicas para alto-forno a coque com ICP.

**Tabela III.11** - Propriedades de sinter e pelota requeridas em altos-fornos com injeção de carvão<sup>[15]</sup>.

<b>Propriedades</b>	<b>Sínter</b>	<b>Pelota</b>
<b>Granulometria</b>	< 5mm ou < 6mm Max. 5%	> 16mm ? Máx. 5%
	< 10mm? Máx. 30%	8 – 10mm? Min. 85%
	> 50mm ? Máx. 10%	< 6,3mm ? Máx. 5%
<b>Resistência mecânica ISO 3271<sup>15</sup></b>	> 6,3mm? = 70 – 80%	> 6,3mm ? Min. 95% < 0,5mm ? Máx. 5%
<b>Redutibilidade ISO 4695<sup>16</sup></b>	1,4 – 1,6% / minuto	Min. 0,8% / minuto
<b>RDI - ISO 4696<sup>17</sup></b>	< 3,15mm ? 30 – 33%	
<b>LTB ISO DIS 4697<sup>18</sup></b>		> 6,3mm ? Min. 80% < 0,5mm ? Máx. 15%
<b>Colagem ISO DP 4698<sup>19</sup></b>		Máx. 15%

O combustível, coque e carvão vegetal, com ICP irão ter um maior tempo de residência no alto-forno, comparando-os para um mesmo nível de produção, favorecendo um maior ataque dos álcalis e degradação pela reação com o CO<sub>2</sub> na zona de gotejamento. Isto provoca diminuição na permeabilidade, baixo teor de álcalis, cinzas, maior tamanho médio de partículas e um alto valor de CSR (resistência após a reação com gás CO<sub>2</sub>) são necessários<sup>[1, 15]</sup>. Na tabela III.12 encontram-se parâmetros de qualidade requeridos para coque, utilizado em alto-forno com ICP.

<sup>15</sup> ISO 3271 – Iron Ores – Determination of Tumbler Strength – Norma internacional para determinação do índice de queda e abrasão do minério de ferro natural e aglomerado.

<sup>16</sup> ISO 4695 – Iron Ores – Determination of Reducibility – Norma internacional para determinação da redutibilidade de minério de ferro e minério natural e aglomerado.

<sup>17</sup> ISO 4696 – Iron Ores – Static Test for Low-Temperature Reduction-Disintegration. Part. 2 – Norma internacional para determinação da redução e decomposição de minério de ferro e aglomerados.

<sup>18</sup> ISO DIS 4697 – Iron Ores. Low temperature Disintegration Test. Part 1. Method using Cold Tumbling after Sieving.

<sup>19</sup> ISO DP 4698 – Iron Ore Pellets - Determination of relative Free-swelling Index – Norma internacional para determinação do índice de inchamento da pelota. Através do aquecimento 900°C em ambiente de CO e N<sub>2</sub>.

**Tabela III.12** - Critérios para a qualidade do coque, utilizado em altos-fornos com injeção de carvão (dados da Europa)<sup>[15]</sup>.

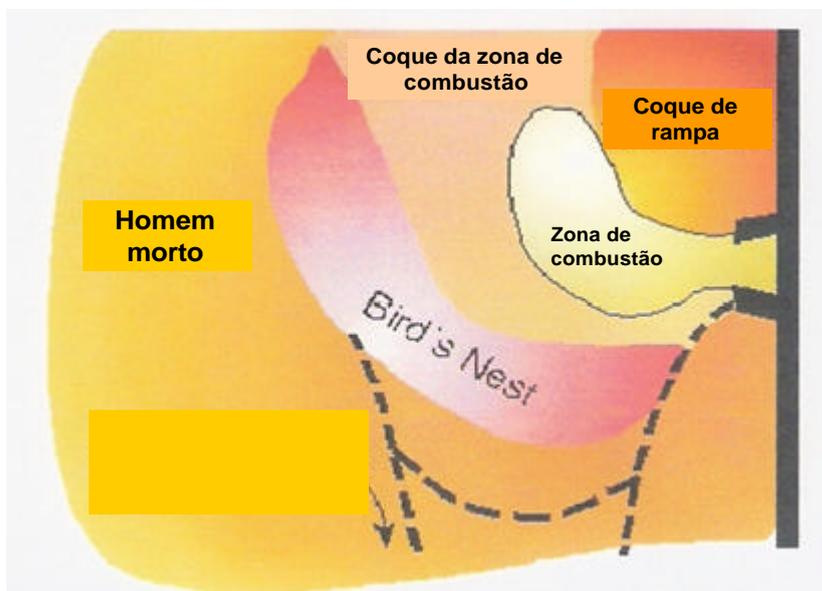
<b>Parâmetros</b>	<b>Faixa de valores</b>
<b>Tamanho médio (mm)</b>	50 – 60
<b>Tamanho sem fissura (mm)</b>	50 – 55
<b>Índice de estabilidade</b>	90 – 95
<b>M40 (+60mm)</b>	> 80 a > 88
<b>M10 (+10mm)</b>	< 5 a < 8
<b>I40</b>	53 – 55
<b>I20</b>	> 77,5
<b>CSR</b>	60 – 70

- Mudança na distribuição de carga – com o aumento da relação minério/combustível pelo topo com ICP, através da substituição de combustível granulado por carvão injetado, provoca uma queda da permeabilidade. Uma das formas de melhorar a permeabilidade seria a mudança da forma geométrica que a carga apresenta no alto-forno, após a distribuição. Isto se faz necessário principalmente pelo carvão vegetal, por causa da sua baixa resistência mecânica, ocasionando sua degradação dentro do alto-forno. Têm se utilizado um sistema de distribuição que privilegie a passagem dos gases no centro do alto-forno, para evitar a descida descontínua da carga, provocando engaiolamento (parada de descida de carga em certo ponto do alto-forno) e arriamento (descida brusca após o engaiolamento)<sup>[1,15 e 27]</sup>.

- Temperatura de chama – Existe uma temperatura de chama ideal para cada alto-forno, na qual, não há descontinuidade na descida de carga (engaiolamento). O aumento da temperatura de chama implica no aumento da temperatura dos gases, isto provoca expansão de volume dos gases, dificultando a passagem dos mesmos<sup>[1 e 15]</sup>. A temperatura de chama será tratada detalhadamente no próximo item.

- Contra pressão - a permeabilidade diminui com aumento da temperatura dos gases e seu volume dentro do alto-forno. Isto implica no aumento da velocidade dos gases dentro do alto-forno. A medida para atenuar este aumento de velocidade dos gases é o uso de contra pressão no topo, diminuindo com isto a queda de pressão<sup>[1 e 15]</sup>.

- Enriquecimento do ar com oxigênio – com altas taxas de injeção, o oxigênio do ar não é suficiente para a combustão de todo o carvão injetado. Com isto, o carvão pulverizado formará uma camada em torno da zona de combustão (*bird's nest*) ou alojará no interstícios da carga do alto-forno, provocando com isto a perda de permeabilidade. Aumento da espessura do “*bird's nest*” (ninho de passarinho) provoca perda de permeabilidade (vide figura 3.22). A prática de enriquecimento de oxigênio do ar injetado nas ventaneiras do alto-forno tem sido utilizada para melhorar a performance de queima de carvão no “*raceway*”, diminuindo o problema de acúmulo de carvão pulverizado prejudicando a passagem dos gases<sup>[1, 14 e 15]</sup>.



**Figura 3.22** – Esquema representativo de estrutura de coque no nível das ventaneiras do alto-forno<sup>[14 e 15]</sup>.

## 2º - Temperatura de Chama

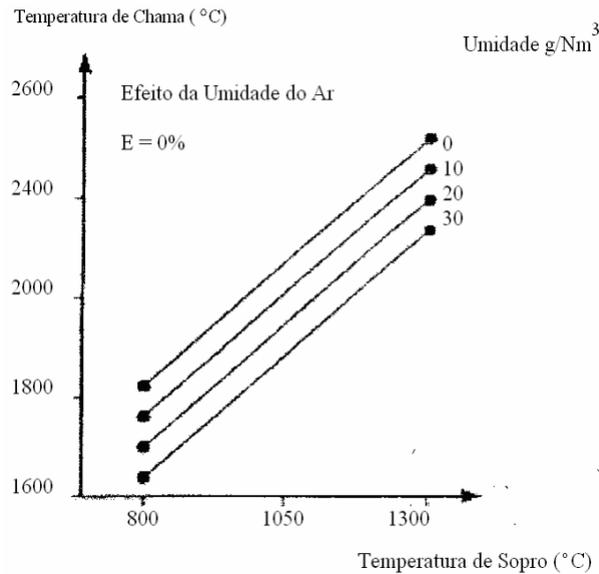
Temperatura de chama é a temperatura que os gases saem da zona de combustão, após as reações na zona de combustão (reação de combustão, reação de desvolatilização, reação de vaporização, reação de decomposição de voláteis e água). Ela depende da composição química do carvão, oxigênio, taxa de injeção de carvão e temperatura de sopro. Normalmente é uma temperatura calculada, considerando condições adiabáticas (não há troca de calor com o sistema em questão).

A injeção de carvão pulverizado é considerada refrigerante para o alto-forno. Isto pode ser explicado pela temperatura que o carvão pulverizado é injetado, em torno de 50°C.

Apesar de o carvão sofrer combustão, o calor gerado é menor que o reinante neste local, ou seja, a temperatura da combustão do carvão pulverizado é menor que a temperatura da zona de combustão, isto provoca uma diminuição de temperatura dos gases, o que pode ser observado na figura 3.28<sup>[6]</sup>.

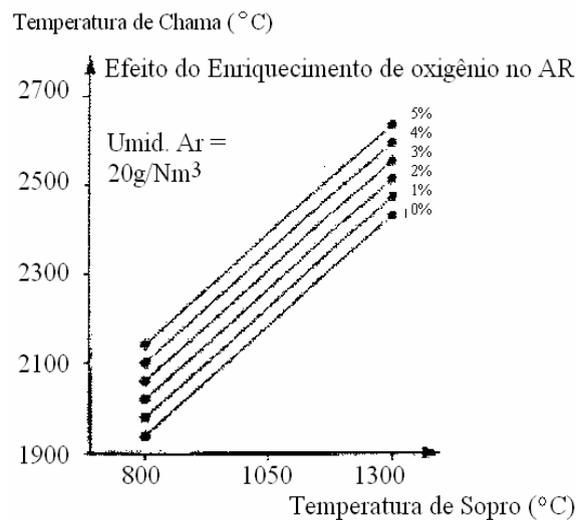
A temperatura de chama é importante, pois as reações de combustão, a permeabilidade, e a temperatura de gusa e escória dependem dela. Alguns parâmetros que podem ser alterados no alto-forno, em função da diminuição da temperatura de chama com ICP, são:

- Temperatura de sopro – é a temperatura que o ar injetado chega à zona de combustão. Esta temperatura varia com o equipamento de aquecimento do ar (regenerador) e alto-forno. Estudos mostram que para cada grau de temperatura de sopro aumentado há um acréscimo de  $0,97^{\circ}\text{C}$  na temperatura de chama. Isto é importante por que a relação de troca é praticamente um por um. Na figura 3.23 observa-se o aumento da temperatura de chama com a temperatura de sopro. Deve-se salientar que a umidade do ar que entra nas ventaneiras do alto-forno provocará a diminuição da temperatura de chama, também representado na figura 3.23. Isto por causa das reações endotérmicas de vaporização e decomposição da água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figura 3.23** – Efeito da temperatura de sopro e da umidade do ar sobre a temperatura de chama no alto-forno<sup>[1]</sup>.

- Enriquecimento de oxigênio – é aumentar a quantidade de oxigênio no ar soprado, conseqüentemente acarreta uma diminuição de nitrogênio. Como este gás, nitrogênio, entra a uma temperatura menor (temperatura de sopro) que a temperatura de chama, ele irá “roubar” calor do sistema. A figura 3.24 mostra a relação entre temperatura de chama e sopro, variando o parâmetro de enriquecimento de oxigênio, ou seja, o crescimento da temperatura de chama com o aumento de enriquecimento de oxigênio e temperatura de sopro.



**Figura 3.24** - Efeito da temperatura de sopro e do enriquecimento do ar sobre a temperatura de chama do alto-forno<sup>[1]</sup>.

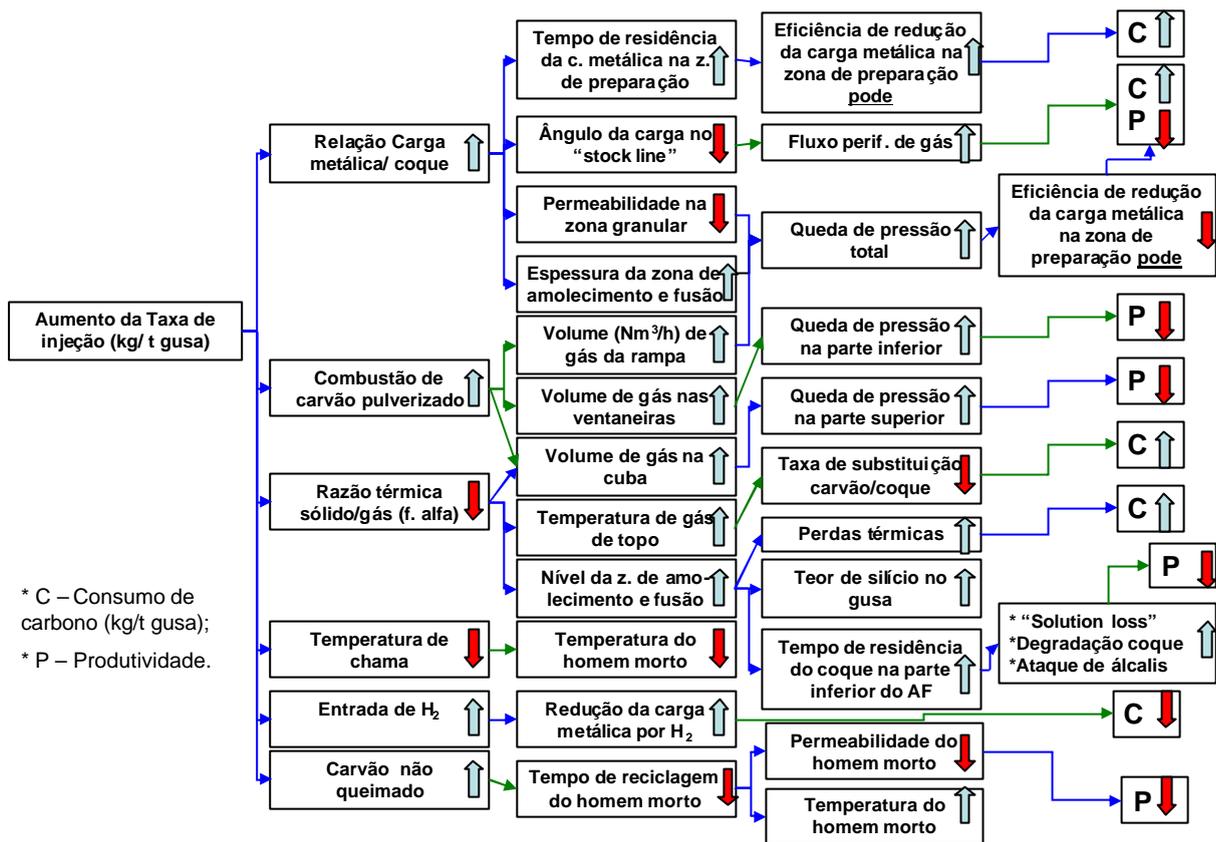
- Qualidade do carvão injetado – A umidade, cinzas e materiais voláteis irão contribuir para o declínio da temperatura de chama. As reações desses componentes do carvão injetados são endotérmicas, ou seja, irão necessitar de calor para acontecer, abaixando a temperatura de chama. Observando somente o parâmetro temperatura de chama, seria ideal um carvão pulverizado injetado com a maior porcentagem de carbono fixo em sua composição, dependendo da reatividade<sup>[1,29 e 52]</sup>.

### *3º – Distribuição de Carga no Alto-Forno*

A distribuição de carga é uma operação importante no alto-forno e possui o objetivo de igualar os efeitos da segregação dos tamanhos de grão maiores da carga que, ao serem descarregados dentro do alto-forno, tendem a separar-se dos mais finos<sup>[2]</sup>. Ou seja, é importante se adequar o escoamento gasoso de acordo com o necessário para operação no alto-forno, determinando assim a eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente o formato e a posição da zona coesiva e da carga térmica sobre a parede do forno<sup>[3]</sup>.

O aumento da relação minério/coque provoca diminuição de regiões vazias nas quais passariam os gases, prejudicando seu fluxo. Este é o caso do alto-forno com ICP. A distribuição ditará o fluxo gasoso. Então, o fluxo ideal seria o central, reduzindo perda de carga na coluna<sup>[3]</sup>.

A figura 3.25 mostra um fluxograma onde se observam a influência do aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado, com os parâmetros do alto-forno e análise química do ferro-gusa. Observe que as setas em azul mostra um aumento e a vermelha representa decréscimo.



**Figura 3.25** – Previsão das alterações no alto-forno em função do aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado<sup>[1 e 15]</sup>.

#### IV - Princípios para ICP

A ICP é uma técnica que traz vantagens na operação de alto-forno, como descritas no item 3.3.2. Para que essas vantagens ocorram é necessário que alguns conceitos/princípios devam ser seguidos. Abaixo eles estão detalhados.

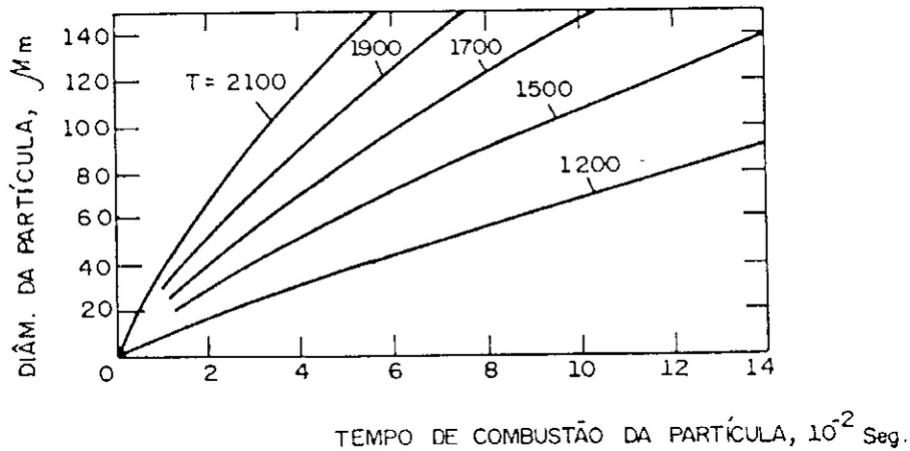
*1º - o carvão deve queimar na zona de combustão<sup>[1 e 16]</sup>*

Medidas:

- O carvão deve ser pulverizado na menor granulometria economicamente possível;
- Enriquecer o ar soprado com oxigênio pode ser necessário para taxas muito elevadas, ou para casos onde não haja possibilidade de aumentar-se a temperatura de sopro.

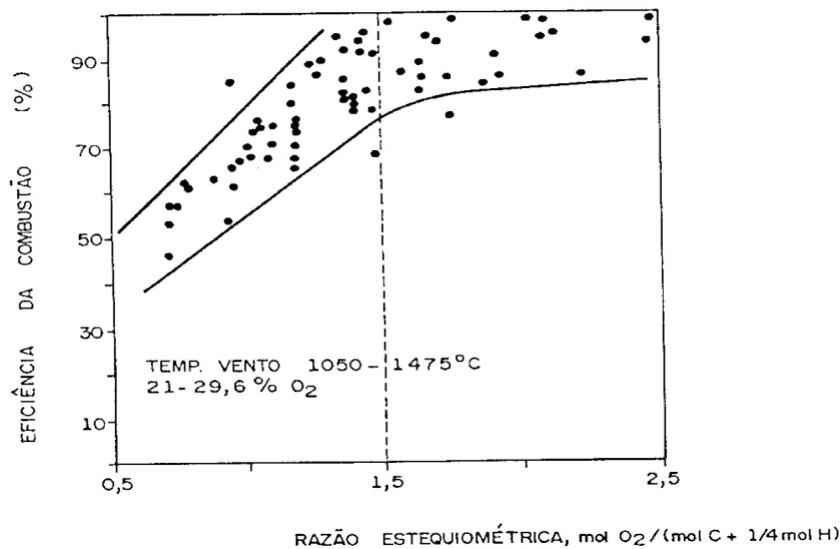
A figura 3.26 mostra a dependência da granulometria com a velocidade de combustão, ou seja, quanto menor a granulometria maior a velocidade de combustão. Entretanto é

importante ressaltar que a eficiência do sistema de pulverização, induzindo a diminuição da granulometria do produto, aumenta o custo final do carvão injetado.



**Figura 3.26** – Influência do diâmetro da partícula de carvão pulverizado sobre o tempo total de combustão para diferentes temperaturas da fase gasosa<sup>[6]</sup>.

Conforme se pode observar na figura 3.27, a eficiência da combustão do carvão aumenta com a elevação da razão estequiométrica até um valor desta de 1,5 (valor máximo). Esta razão é entendida como a relação entre a quantidade de ar fornecida e aquela necessária para oxidação do combustível injetado a  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . O efeito da taxa de injeção pode ser analisado a partir da razão estequiométrica, ou seja, quanto maior a taxa de injeção, para uma mesma porcentagem de oxigênio no ar de sopro, menor o valor da razão estequiométrica e conseqüentemente menor a eficiência da combustão do carvão.



**Figura 3.27** – Eficiência da combustão em função da razão estequiométrica<sup>[6]</sup>.

## *2° - distribuir o carvão proporcionalmente uniforme pelas ventaneiras<sup>[1 e 16]</sup>*

Deve-se projetar o sistema de ICP para que se tenha o menor desvio entre as quantidades de carvão que chegam a cada ventaneira, comparativamente a vazão de ar, garantindo um bom equilíbrio térmico.

## *3° - garantia de funcionamento<sup>[1 e 16]</sup>*

O sistema de ICP deve ter alta taxa de utilização dado que uma alteração na carga do alto-forno só surte efeito em seis horas. Portanto, um corte abrupto da injeção no alto-forno somente será totalmente compensado, após seis horas da troca da carga.

Deve haver também um fluido que pode ser o próprio ar, que mantenha a linha pressurizada evitando-se o retorno de ar quente. Naturalmente cuidados devem ser levados em conta, quando o redutor a ser injetado tem baixa temperatura de ignição. Nestes casos, é interessante que se adote um gás inerte para transporte pneumático.

## *4° - estocagem do carvão pulverizado<sup>[1 e 16]</sup>*

Deve-se ter uma capacidade de estocagem para no mínimo, seis horas de injeção, visando suprir qualquer parada no sistema de preparação. Neste caso, supõe-se que não ocorra problema de fornecimento de carvão pulverizado a jusante do silo de estocagem. No caso de isto ocorrer, uma avaliação térmica do alto-forno é fundamental, sob pena de colocar em risco a operação normal do reator. Pode-se pensar, no limite em se parar o alto-forno, caso o nível térmico do equipamento não comporte a parada abrupta da ICP em suas ventaneiras. Isto pode acontecer quando o sistema de ICP, após o silo de armazenamento, falha por mais de uma hora. É importante também que o forno esteja esgotado de gusa e escória, caso haja parada não programada.

## *5° - umidade do carvão<sup>[1 e 16]</sup>*

O sistema de ICP deve garantir um carvão para injeção com umidade máxima de 4% para evitar aglomeração do carvão e abaixamento da temperatura de chama.

## *6° - incêndio e explosão<sup>[1 e 16]</sup>*

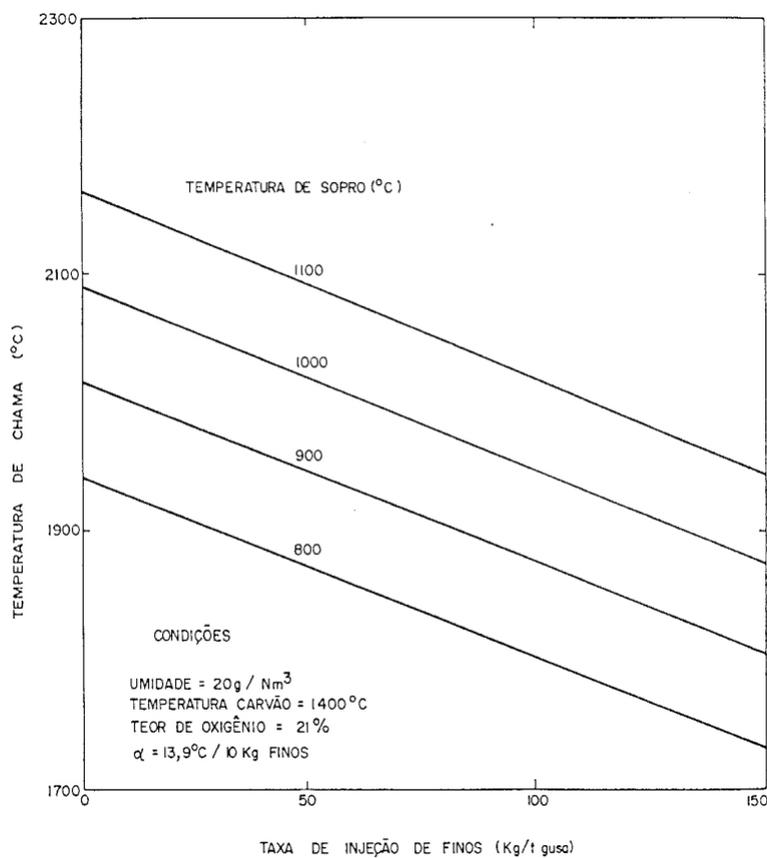
Por utilizar um combustível reativo e pulverizado, a instalação de ICP deve ser protegida contra incêndio e explosão.

7° - temperatura de chama<sup>[1 e 16]</sup>

Sendo a ICP refrigerante, os recursos para a manutenção da temperatura de chama são:

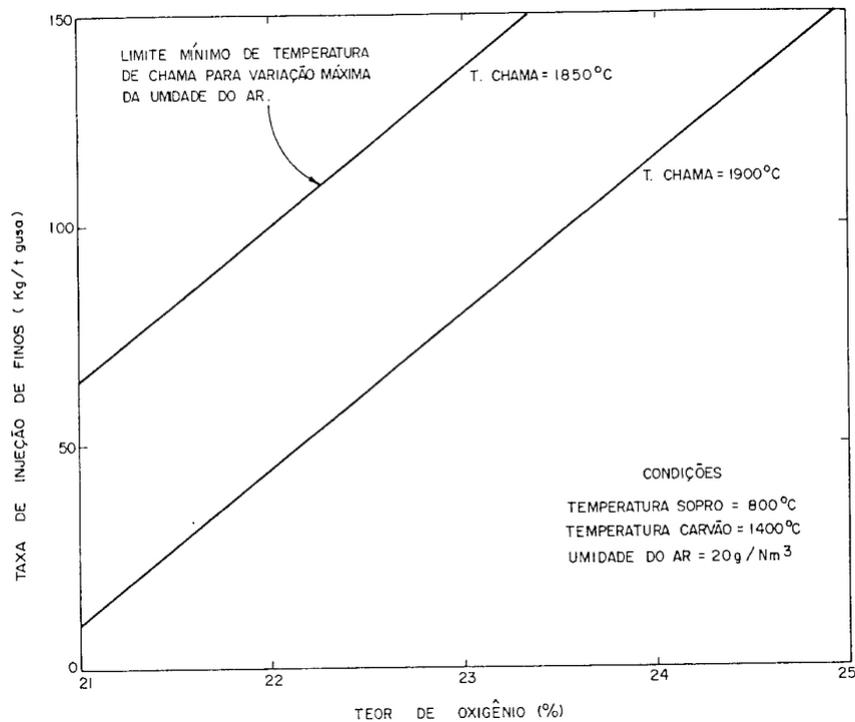
- aumentar a temperatura do ar soprado;
- reduzir a injeção de vapor,
- desumidificar o ar soprado;
- enriquecer o ar soprado com oxigênio.

Na figura 3.28 tem-se um gráfico feito baseado em cálculos de balanço térmico da zona de combustão onde se mostra a influência da taxa de injeção sobre a temperatura de chama. A elevação de 100kg/t gusa na taxa de injeção de carvão pulverizado implica na redução de 140°C na temperatura de chama.



**Figura 3.28** – Influência da taxa de injeção de finos sobre a temperatura de chama (parâmetro é a temperatura de sopro)<sup>[6]</sup>.

A figura 3.29 mostra a influência do teor de oxigênio do ar soprado sobre a temperatura de chama considerando vários níveis de injeção. Ou seja, aumento da temperatura de chama com o enriquecimento de oxigênio injetado nas ventaneiras de alto-forno.

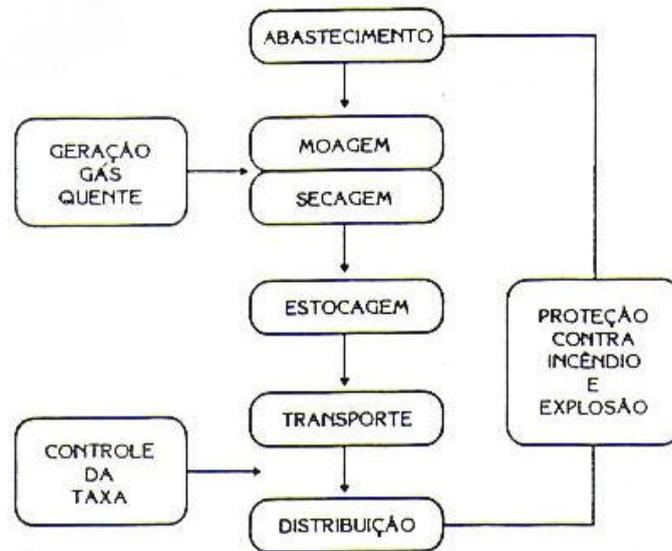


**Figura 3.29** – Influência do teor de oxigênio sobre a taxa de injeção de finos (parâmetros é a temperatura de chama)<sup>[6]</sup>.

Estes princípios aceitos universalmente levam as empresas que projetam e constroem sistemas de injeção de carvão pulverizado a estabelecer critérios bem definidos para o projeto, engenharia e construção das unidades. Eles foram baseados fundamentalmente em usinas siderúrgicas que usam coque como termo-redutor e carvão mineral como agente de injeção. Portanto, é fundamental se estudar com maiores detalhes o carvão vegetal no tocante ao seu emprego como agente de injeção e o que poderia ser feito para alcançar índices técnicos e econômicos vantajosos para as empresas que adotam a tecnologia. Normalmente, antes da implantação de sistemas de injeção de carvão vegetal pulverizado, deveriam ser desenvolvidos estudos técnicos e econômicos para se estudar completamente o assunto, antes inclusive de se comprar/desenvolver qualquer sistema de injeção. Estas experiências foram praticadas tanto pela Acesita, quanto pela Mannesmann, com sucesso absoluto na implantação da técnica, na década de 1980.

### 3.3.5 Instalações

Embora cada empresa adote o seu “*lay-out*” específico para o sistema de injeção de carvão pulverizado, as fases de injeção obedecem em sua maioria, a uma seqüência como mostrado na figura 3.30.



**Figura 3.30** - Fluxograma genérico de injeção de carvão pulverizado em alto-forno <sup>[1]</sup>.

A tabela III.13 mostra os principais sistemas de ICP no mundo. Deve ser salientado, que praticamente todos os sistemas mostrados nesta tabela são direcionados para a siderurgia a coque e carvão mineral como agente injetante. Para o carvão vegetal, o primeiro sistema implantado foi o brasileiro desenvolvido pela Acesita. Posteriormente duas outras empresas se dispuseram a fazer estudos de engenharia e projeto, que foram a Küttner que iniciou a operação de uma unidade piloto nos idos de 1984, na Mannesmann) e mais recentemente liderado pela Praxair (White Martins) com implantação de unidades em algumas empresas siderúrgicas do grupo dos PIG. Esta última utiliza o sistema de transporte do pó desenvolvido pela Clyde Materials Handling.

**Tabela III.13** - Sistemas de injeção de carvão pulverizado no mundo<sup>[1]</sup>.

<b>Projeto (Empresa)</b>	<b>País</b>
I – ARMCO – BABCOCK	Estados Unidos da América
II – SISC	China Continental
III – PETROCARB/KOBE	EUA/Japão
IV – RUSSO	URSS
V – CLYDE MATERIALS HANDLING (*)	Inglaterra
VI – PAUL WÜRTH	Luxemburgo
VII – KOSTE	Alemanha
VIII – KLÖCKNER	Alemanha
IX – KÜTTNER	Alemanha/Brasil
X – SOLLAC CARBINJECT	França
XI-SPRÜNK	França
XII – KAWASAKI – DENKA	Japão
XIII-GODO	Japão
XIV – SUMITOMO	Japão
XV – ACESITA	Brasil
XVI – Praxair/White Martins	EUA/Brasil

(\*) Antigo sistema da Macawber.

Dos sistemas existentes no mundo, tem-se mostrado um exemplo dos mesmos, conforme a tabela III.14. Esta classificação identifica o tipo de transporte pneumático adotado, a empresa projetista e o sistema de moagem.

**Tabela III.14** - Alguns tipos de transporte pneumático, sistemas de moagem e empresas de projeto<sup>[1]</sup>. Base: 1995.

<b>Item</b>	<b>Especificações</b>		
<b>Tipo de transporte</b>	Densa - 27,5 %	Diluída - 59,8 %	Combinada -12,7 %
<b>Empresa – projeto</b>	Armco – 19,3%	Küttner - 18,3 %	Paul Wurth - 13,3 %
<b>Sistema de moagem</b>	Rolo – 77,9 %		

Deve ser comentado que a adoção da tecnologia de transporte em meio denso tem sido bastante intensificada. Para se ter uma idéia, no Brasil, nos últimos 5 anos, tem havido uma concentração desta tecnologia, conforme mostra a tabela III.15. Apesar dos projetos de injeção de carvão vegetal pulverizado nos PIG terem sido projetados para se atingir taxas da ordem de 120kg por tonelada de gusa<sup>20</sup>, os valores praticados tem sido da ordem de 50 até 70 kg por tonelada de gusa<sup>20</sup>, muitas vezes tornando o sistema pouco rentável.

<sup>20</sup> Contatos pessoais com técnicos dos PIG, em setembro de 2006, seminário nacional realizado em Ouro Preto, organizado pela ABM.

**Tabela III.15** – Algumas unidades de injeção implementadas no Brasil, referente aos  
 PIG desde 2002<sup>21</sup>.

Usina	Local	Alto-Forno	Venta-neiras	Taxa de injeção (kg/t)	Modelo	Ano
Cisam	MG	2	6	120	12/8 - 24/8 300x100	2002 e 2004
Simara	PA	1	10	120	16/8/250 x80v	2003
Sidersa	MG	1	8	120	12/8 - 24/8 300x100	2004
CBF	ES	2	10	120	12/8 - 24/8 300x100	2004
Cosipar	PA	4	6	120	12/8 - 24/8 300x100	2005
Calsete	MG	2	8 e 12	120	18/12F-36/12 350x110	2005
Gusa Nordeste	MA	3	8, 12 e 12	120	18/12F-36/12 350x110	2006
Plantar	MG	2	9	120	18/12F-36/12 300x100	2007
Pindaré	MA	3	10, 12 e 12	120	18/12F-36/12 350x110	2007
Cosima	MG	1	10	120	18/12F-36/12 350x110	2007

### 3.3.6 Aspectos Econômicos

Trabalhos apresentados em congressos, seminários e encontros, por colaboradores de siderúrgicas, confirmam um dos objetivos precípuos da ICP: Economia no custo de produção de ferro gusa em alto-forno. O exemplo é da empresa siderúrgica Acesita, que utiliza em um dos seus altos-fornos, carvão vegetal como combustível e redutor. Este caso representa o lucro obtido pela empresa no ano de 1989<sup>[6]</sup>. Apesar de datado ainda da década de 80, estes números podem ser considerados atuais, no entanto com variações nos preços de matérias-primas: moinha e carvão bruto.

Com uma capacidade inicial de aproximadamente 10t/h para injeção de carvão vegetal pulverizado nos seus dois altos-fornos, com custo de aproximadamente US\$ 6,5 x 10<sup>6</sup>, incluindo obra civis e montagem. Este custo foi inflacionado em dólares americanos, de 1981 a 1989. Também representa o caso atual de várias empresas dos **Produtores Independentes de Gusa**<sup>[6]</sup>. Deve ser comentado que a CBF possui uma unidade

<sup>21</sup> E-mail enviado pela Clyde Materials Handling, Sr. Daniel Anderson, em dezembro de 2007.

comprada da White Martins, cujo valor estimado foi de 4 Milhões de Reais, para uma taxa de 6 t/h para os dois altos-fornos<sup>22</sup>.

Neste caso, a equação usada leva em consideração os custos de implantação e manutenção. A economia da injeção irá depender da diferença entre o custo do carvão granulado, carregado no topo, e do carvão injetado, podendo, portanto ser descrito pela expressão 3.22<sup>[1,6]</sup>:

$$E = PC * [(CCB * F / TS * (d / 1000)] - CCI) * (P * 1 / 1000) \quad (3.22)$$

Onde:

E = Economia anual [US\$/ano];

PC = Peso específico do carvão injetado [kg/t gusa];

CCB = Custo do carvão bruto [US\$/m<sup>3</sup>];

F = Fator de conversão de carvão granulado para carvão bruto;

TS = Taxa de substituição;

d = Peso específico do carvão bruto [kg/ m<sup>3</sup>];

CCI = Custo do carvão injetado [US\$/t];

P = Produção anual de gusa [t/ano].

A matriz de custo do carvão injetado nos altos-fornos da Acesita, considerando-se valores médios do ano de 1989 está apresentado na tabela III.16, onde se observa a grande influência do custo da matéria-prima (moinha), que chega a quase 60% do custo do carvão injetado<sup>[6]</sup>.

Observa-se também que a moinha e o custo de capital correspondem juntos a quase 90% do custo do carvão injetado. Os outros dados necessários ao cálculo da economia obtida com a injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos da Acesita estão apresentados na tabela III.16 e III.17<sup>[6]</sup>.

---

<sup>22</sup> Referencia estimada de Flávio Edmundo dos Anjos, aluno da REDEMAT 2007, Dezembro 2007.

**Tabela III.16** – Matriz de custo do carvão injetado nos altos-fornos da Acesita<sup>[6]</sup>.

INSUMO	CUSTO US\$/tcp*	% sobre o total
Moinha (incluindo transporte)	24,0	58,5
Energia Elétrica	0,6	1,5
Gás Combustível	1,1	2,7
Utilidades (AR comp., N <sub>2</sub> , etc.)	0,4	1,0
Operação	1,3	3,1
Manutenção (pessoal + peças repos.)	1,6	3,9
Custo de Capital **	12,0	29,3
T O T A L	41,0	100,0

\* cp - carvão pulverizado

\*\* custo de capital - 10 anos com juros de 8% a.a.

**Tabela III.17** – Valores médios dos dados utilizados para o cálculo da economia obtida com a injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos da Acesita<sup>[6]</sup>.

DADO	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2
P (t/ano)	160.586	336.250
PC (Kg/t gusa)	124	126
CCI (US\$/t)	41	41
CCB (US\$/m <sup>3</sup> )	21,31	21,31
F	1,36	1,36
d (Kg/m <sup>3</sup> )	225	229
TS	1,0	1,0

Considerando-se os dados das duas últimas tabelas pode-se calcular a economia obtida com a injeção de carvão pulverizado na Acesita no ano de 1989, chegando-se aos seguintes resultados<sup>[6]</sup>:

Economia no alto-forno 1 ~ US\$ 1.748.473,00 por ano

Economia no alto-forno 2 ~ US\$ 3.624.845,00 por ano.

Estes valores representam como a ICP pode ser interessante para empresas siderúrgicas não integradas, que é o caso dos FIG. Se colocar valores atuais, levando em consideração os avanços tecnológicos, o preço do carvão vegetal de R\$108,53mdc<sup>23</sup> e não levando em consideração o valor de compra da moinha que vêm nos interstícios do carvão granulado, certamente esses valores poderiam ser maiores<sup>[6]</sup>.

### **3.3.7 Misturas de carvão vegetal e mineral pulverizados para injeção nas ventaneiras de alto-forno**

Uma prática utilizada nas empresas é a mistura de materiais pulverizados para injeção em alto-fornos. Esta prática tem como intuito economizar custos de produção de ferro gusa, melhorar o desempenho da injeção em alto-forno e aumentar a gama de materiais a ser aproveitado (co-produtos), preservando assim as reservas mundiais desses materiais. Dentre essas melhorias pode ser citado aumento de produtividade do alto-forno, taxa de injeção, melhoria nos níveis de qualidade de ferro-gusa, taxa de substituição, como também, diminuição de consumo específico de combustível.

Algumas misturas de materiais como carvões minerais e carvão de petróleo verde<sup>[17]</sup>, carvões minerais de baixo e alto volátil<sup>[18]</sup>, gás natural e carvão mineral<sup>[19]</sup>, dolomita e carvão mineral<sup>[20]</sup>, carvão vegetal e mineral<sup>[1,2]</sup>, pneus e carvão mineral<sup>[21]</sup> e plástico e carvão mineral<sup>[22]</sup> apresentaram ganhos substanciais em estudos realizados, claro que cada uma com sua peculiaridade.

Trabalhos usando modelamento físico e matemático, simulando a operação com injeção simultânea de carvão mineral e vegetal com sopro enriquecido de oxigênio já foram realizadas com resultados expressivos. Utilizando o modelamento matemático baseado na teoria do multi-fluido, a tabela III.18 mostra três casos distintos; a) - caso 1 – injeção carvão mineral, b) - caso 2 – injeção de carvão vegetal e c) - caso 3 – injeção de carvão vegetal e mineral simultâneo. A taxa de injeção nos casos 1 e 2 foi em torno de 200kg/t gusa e caso 3 de 200kg/t de carvão mineral e 50kg/t de carvão vegetal. As composições

---

<sup>23</sup> Preço médio de carvão vegetal em Minas Gerais, acumulado até o mês de Outubro de 2007; fonte do site da Associação Mineira de Silvicultura (AMS), 15/01/2008.

<http://www.showsite.com.br/silvimiras/html/AnexoCampo/car.pdf.pdf>

dos combustíveis usados estão representadas na tabela III.19 e utilizando alto-forno a coque de volume de 1370m<sup>3</sup> [20].

**Tabela III.18** – Parâmetros operacionais para injeção simultânea<sup>[20]</sup>.

Parâmetros operacionais	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Taxa de ICP (kg/t)	199,54	198,83	250
Enriquecimento de Oxigênio (%)	4,60	5,98	7,32
Produtividade (t/dia/m <sup>3</sup> volume útil)	2,527	2,744	3,138
Taxa de sopro (Nm <sup>3</sup> /t de gusa)	947,18	888,83	790,76
Taxa de coque (kg/t)	285,26	289,71	234,79
Taxa de combustível (kg/t)	484,8	488,54	483,56
Gás de topo (Nm <sup>3</sup> /t)	1546,09	1580,8	1413,88
Poder calorífico do gás de topo (MJ/Nm <sup>3</sup> )	5,859	6,022	6,297
Taxa de escória (kg/t)	262,4	256,36	268,22
Basicidade (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,211	1,222	1,09
%Si	0,436	0,010	0,064

**Tabela III.19** – Composição dos combustíveis<sup>[20]</sup>.

Análise elementar (%)	Coque	Carvão mineral pulverizado	Carvão vegetal pulverizado
Carbono fixo	89,7	73,4	73,39
Matéria volátil	-	19,4	25
Cinzas	8,08	7,2	1,3
H <sub>2</sub> O	2,12	-	0,4
Carbono total	89,9	82,3	78,2
<b>Composição das Cinzas (%)</b>			
SiO <sub>2</sub>	52,6	62,5	33,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,9	22,2	2,3
MgO	1,3	1,3	7,6
CaO	13,1	11,1	52,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	3,8
Outros	-	2,9	0,8

Os resultados mostraram que a injeção conjunta apresenta uma possibilidade de aumento de produtividade, diminuição de consumo específico de coque, no silício do ferro gusa, basicidade da escória, aumento do poder calorífico do gás de saída (gás de topo) e obtendo assim uma operação estável do alto-forno<sup>[20]</sup>. O maior problema desta técnica de mistura aloja-se no aspecto operacional, sendo complexo no caso de uma única instalação de injeção para os dois carvões e aumento de custo, no caso de duas unidades de injeção, separado para cada carvão<sup>[20]</sup>. A questão de disponibilidade de moinha de carvão vegetal deve também ser considerada, para o caso de injeção de misturas contendo pó de carvão vegetal em altos-fornos a coque, pois a produção nestes

reatores é significativamente superior aquela observada em altos-fornos a carvão vegetal.

### **3.4 Injeção de Materiais Pulverizados em Alto-Forno**

O carvão pulverizado, seja vegetal ou mineral, é o material mais usado na injeção de materiais em alto-forno pelas ventaneiras. Esta técnica já está consolidada nas empresas siderúrgicas do mundo inteiro, mas mesmo assim, é fonte de estudo para melhoria constante de processo e matérias-primas, como neste projeto. Teoricamente, qualquer material que contenha alta porcentagem de hidrocarbonetos é possível de ser injetado pelas ventaneiras do alto-forno. A lista de materiais já testado é grande e inclui: plásticos picotados, óleo combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, pneu, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados, entre outros. A escolha do material mais adequado passa, obviamente, pelos aspectos práticos e econômicos desta injeção. Abaixo está descrito um resumo de algumas injeção de materiais.

#### ***I - Injeção de Minério de Ferro***

A injeção de minério de ferro pulverizado pelas ventaneiras de alto-forno tem como objetivo produzir gusa com baixo teor de silício, aumentar o rendimento metálico (ferro gusa) e diminuição de fino de minério depositado. Iniciando com isto o pré-tratamento do ferro gusa para Aciaria, onde será transformado em aço. O IMF (Injeção de Minério de Ferro) pode ser injetado através de mistura com carvão, água (polpa) e gás. O maior adversário desta técnica seria o aumento de consumo de carbono/t gusa e as tecnologias de pelotização e sinterização as quais utilizam este material, como matéria-prima, na suas instalações<sup>[1 e 45]</sup>.

#### ***II - Injeção de Pneu***

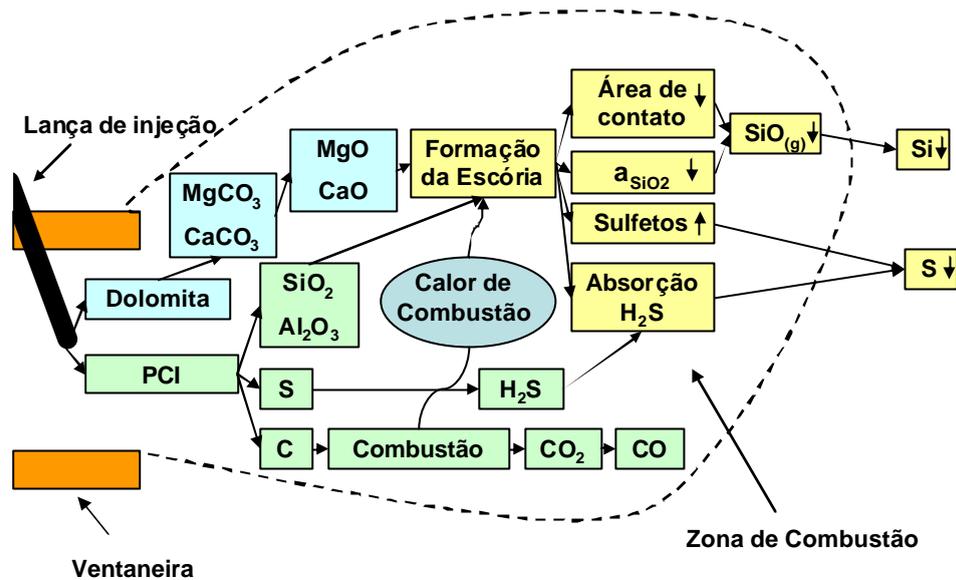
O pneu moído pode substituir os finos de carvão mineral e/ou finos de carvão vegetal em altos-fornos. A injeção através das ventaneiras contribui para geração de energia e também para gerar um gás para redução dos óxidos de ferro carregados nos altos-fornos. O pneu moído contribui para diminuição dos pneus dispostos de forma incorreta na natureza. Uma das vantagens do uso deste material está no baixo custo, podendo se transformar em um produto de alto valor agregado e uma boa combustibilidade<sup>[14]</sup>. Um

dos inconvenientes seria o alto teor de Fósforo ( $\pm 1\%$ ) contido no pneu, ficando assim sua taxa de injeção presa a qualidade química do ferro gusa.

### ***III - Injeção de fundentes***

Calcário e Dolomita são exemplos de fundentes que podem ser injetados em alto-forno. Como no IMF, os fundentes possuem a finalidade de pré-tratar o ferro gusa para Aciaria, neste caso, a diminuição do teor de Enxofre do ferro gusa. Com o crescente uso de gaseificadores de carvão na indústria química, o uso de catalisadores para acelerar a combustão de carbono nestes equipamentos foi extensivamente estudado. Estas pesquisas mostram que compostos como  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{CaCO}_3$  podem ser usados como aceleradores da combustão de finos de carvão durante a injeção no alto-forno. O inconveniente na injeção de fundentes estaria no aumento de consumo de carbono/t gusa<sup>[1 e 42]</sup>.

A figura 3.31 demonstra o efeito da injeção simultânea de carvão pulverizado e dolomita dentro da zona de combustão e na composição química do ferro gusa. Os componentes básicos da dolomita se decompõem primeiramente em óxidos básicos e reagem com os componentes ácidos das cinzas do carvão mineral pulverizado, gerando a escória. A injeção de dolomita provoca diminuição de silício no ferro gusa, isto por que os óxidos que formam a dolomita são básicos e provocam a diminuição da atividade da  $\text{SiO}_2$  do carvão, diminuindo assim a formação do gás  $\text{SiO}$  que reagiria com o ferro-gusa, fazendo com que este incorpore silício (Si) na sua composição. Em relação ao enxofre, há um aumento na formação do gás  $\text{H}_2\text{S}$  e absorção pela escória, logo irá diminuir a quantidade de enxofre no ferro gusa<sup>[1 e 42]</sup>.



**Figura 3.31** – Efeito da simulação de carvão e dolomita nos fenômenos da “*raceway*” e componentes do ferro gusa<sup>[42]</sup>.

#### ***IV - Injeção de Pó de Balão***

Este resíduo da produção de ferro gusa possui uma mistura de coque, minério de ferro e fundentes. Como material para injeção teria o mesmo resultado da mistura de coque, minério de ferro e fundentes, guardadas as proporções destes<sup>[7 e 48]</sup>. Deve-se destacar a presença de Alcalis e Zinco neste material, os quais podem ficar circulando dentro do alto-forno, em virtude de seu ponto de vaporização baixo e de sublimação alto<sup>[48]</sup>.

#### ***V - Injeção de Plástico***

O processamento de sucata plástica através da sua injeção em altos-fornos siderúrgicos mostrou ser plenamente viável técnica e economicamente no Japão e Alemanha, podendo contribuir significativamente para a solução do grave problema do lixo plástico. Isto foi possível, por causa da promulgação da legislação obrigando aos fabricantes e transformadores de material plástico a reprocessarem seus produtos após o fim de sua vida útil. No caso do Brasil seria necessário o mesmo caminho na mudança da legislação<sup>[44 e 46]</sup>.

Do ponto de vista técnico, há diversos aspectos que devem ser considerados ao se injetar sucata plástica em altos-fornos. Em primeiro lugar, por se tratar de material pós-consumo, a composição química da sucata plástica obtida inevitavelmente irá variar aleatoriamente ao longo do tempo, ao sabor do que será descartado pela população, precisando assim um controle rigoroso dessas características. Outro problema bastante sério é a presença de PVC na sucata plástica. Essa resina contém cloro, o qual é liberado durante sua queima e agregado na forma de HCl ao gás que o alto-forno gera em sua operação, tornando-o mais corrosivo, provocando ataque às tubulações e queimadores. O resíduo automotivo leve também pode conter elementos prejudiciais ao processo siderúrgico, tais como Zn, Pb, álcalis e Cl. Além disso, ele pode ser contaminado pela sucata metálica decorrente da trituração do automóvel, podendo contaminar o gusa (e o aço líquido produzido a partir dele) com P, S, Cu, Cr, Ni e V, elementos que podem ser prejudiciais para as características do produto siderúrgico produzido. Infelizmente as soluções para esse problema não são de custos baixos <sup>[44 e 46]</sup>.

A tabela III.20 mostra os valores dos principais parâmetros operacionais dos altos-fornos da siderúrgica japonesa NKK antes e após o uso da injeção de sucata plástica. Como se pode observar, as alterações decorrentes da injeção de plástico nesses parâmetros foram virtualmente nulas, o que confirma a compatibilidade dos polímeros com os materiais usualmente injetados nesse reator metalúrgico<sup>[46]</sup>.

**Tabela III.20** - Principais parâmetros operacionais dos altos-fornos da usina siderúrgica japonesa NKK antes e depois da implantação da injeção de sucata plástica<sup>[46]</sup>.

Parâmetros	Condições normais	Com Injeção de Plástico
Taxa de injeção (kg/t)	-	3
PCI (kg/t)	72	73
Consumo específico de coque (kg/t)	473	468
Consumo específico de combustível (kg/t)	545	544
Produção de gusa (t/dia)	10.600	10.638
Temperatura do gusa (°C)	1520	1518
CO no gás de topo (%)	26,3	26,5
CO <sub>2</sub> (%)	21,5	21,3
H <sub>2</sub> (%)	3,4	3,7
Volume gás de topo (Nm <sup>3</sup> )	1758	1778
Poder calorífico do GAF (KJ/ Nm <sup>3</sup> )	3732	3757

## VI - Injeção de Gases

Para a injeção de combustíveis gasosos tem-se o gás de redução, gás natural e gás de coqueria, que são injetados ou nas ventaneiras ou em um determinado ponto situado acima das ventaneiras (gás de redução). Os efeitos da injeção de gás redutor na cuba e outros gases nas ventaneiras são o de reduzir o consumo de redutor carregado pelo topo e aumentar a produtividade<sup>[41 e 58]</sup>.

A injeção de gás natural nas ventaneiras produz grande quantidade de hidrogênio, o qual substitui o monóxido de carbono como gás redutor na cuba. O gás hidrogênio é melhor redutor se comparado ao monóxido de carbono, pois ele permite economizar energia pelo decréscimo da quantidade de redução direta, a qual demanda considerável quantidade de energia para reação. Outro notável benefício é a prevenção do aquecimento global, visto que a água é gerada ao invés de dióxido de carbono. Somando a isso, a tecnologia desta operação não necessita de praticamente nenhum investimento de capital ou equipamento especial se comparado com a injeção de carvão pulverizado<sup>[41 e 58]</sup>. Os maiores vilões desta técnica em comparação a outras são o alto efeito refrigerante do gás natural, conseqüentemente com o maior abaixamento da temperatura de chama<sup>[1]</sup>, como mostrado na tabela III.21 e a instabilidade de preço deste material, no qual hoje depende de importação de outros países, sobretudo da Bolívia (no caso brasileiro).

**Tabela III.21** - Efeito de cinco tipos de injeção em parâmetros do alto-forno, baseado em modelo matemático<sup>[1]</sup>.

Parâmetro	Unidade	Valor	Alteração na temperatura de chama °C	Alteração no “coke-rate” (kg/t)
<b>Injeção pelas ventaneiras</b>				
1- Carvão vegetal	kg/t gusa	+100	-155	-83,0 **
2- Antracito	kg/t gusa	+100	-162	-91,0
3- Carvão alto volátil	kg/t gusa	+100	-218	-76,1
4- Óleo	kg/t gusa	+100	-321	-98,4
5- Gás natural	kg/t gusa	+100 *	-513	82,6
<b>Sopro</b>				
1- Umidade	g/ Nm <sup>3</sup>	+10	-58	+7,7
2-Temp.	°C	+100	+83	-15,5
3- E <sub>O2</sub>	%	+1	+54	-1,4

E<sub>O2</sub>: Enriquecimento do ar em oxigênio

\* ou + 132 Nm<sup>3</sup>/ t gusa

\*\* consumo específico de carvão vegetal enforado.

## VII - Injeção de Líquidos

Com relação aos combustíveis líquidos, deve-se ressaltar a injeção de óleo combustível (petróleo). Secundariamente vem o alcatrão do carvão mineral, procedente da coqueria<sup>[43 e 58]</sup>. A comparação entre as análises químicas do carvão, óleo e sucata plástica mostra que elas são bastante similares<sup>[46]</sup>, conforme se pode observar na tabela III.22. Deve ser sublinhado que a injeção de óleo em altos-fornos foi praticamente abolida a partir do início da década de 80, em função dos elevados preços do BEP (barril equivalente de petróleo) que atingia em 1979, valores da ordem de 36 USD o BEP. Em 2007, este valor já beirou a marca dos 100 USD o mesmo BEP (Estado de Minas, 7-11-2007), indicando que as chances de retornar esta tecnologia é muito remota.

**Tabela III.22** - Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e sucata plástica<sup>[46]</sup>.

% em peso	Agente Redutor		
	Carvão	Óleo	Plástico
C	79,60	85,90	83,74
H	4,32	10,50	12,38
S	0,97	2,23	0,05
Cinzas	9,03	0,05	3,08
Cl	0,20	0,04	0,75
Pb	0,0050	0,0001	0,0002
Cr	0,0013	0,0002	0,0013
Ni	0,0028	0,0075	0,0011
V	0,0045	0,0600	0,0002
Zn	0,0065	0,0001	0,0073
Cu	0,0015	0,0001	0,0013
K	0,2656	0,0010	0,0170
Na	0,0816	0,0010	0,0200

## **4. Desenvolvimento e Metodologia**

Para estudar o comportamento do carvão vegetal pulverizado em altos-fornos de pequeno porte ( $V_u < 300\text{m}^3$ ), considerando as condições restritivas destes reatores que são temperatura de sopro baixa ( $T_s < 900^\circ\text{C}$ ), sistemas de controle de processo simples, elevados consumos de carvão vegetal e baixa produtividade, adotou-se uma linha de estudo de combustão de carvão vegetal, considerando algumas variáveis do redutor e variáveis do processo.

As amostras e dados operacionais são fornecidos pela empresa siderúrgica Calsete, que se encontra na descrição de siderúrgica não-integrada (produto final ferro gusa). Suas características operacionais e de processo identificam com o objetivo deste projeto. A Calsete, Indústria Calcária de Sete Lagoas, localiza-se na cidade de Sete Lagoas em Minas Gerais, possuindo dois altos-fornos de 240.000t/ano de capacidade nominal, com sistema Injeção de Carvão Pulverizado. As amostras foram divididas variando carbono fixo, umidade, granulometria e fonte de geração de carvão pulverizado, como pode ser visto na tabela IV.23.

### **4.1 Preparação de Amostra**

As amostragens foram feitas após o sistema de moagem, secagem e misturas de carvões vegetais do ICP, ou seja, não levou em consideração a sua procedência. A norma NBR6923 (Carvão vegetal – Amostragem e preparação de amostra, de 1981) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) foi utilizada para perfazer as amostras. Estas foram quarteadas e separadas na quantidade de 150g por amostra. As amostras identificadas, levando em consideração sua análise química imediata (C1, C2 e C3), granulométrica (G1, G2 e G3), umidade (U1, U2 e U3) e fonte (AP) podem ser vistas na tabela IV.23. Elas foram armazenadas em recipientes plásticos devidamente preparados para recebê-las, vide figura 4.32.

**Tabela IV.23** - Amostras identificadas de acordo com a sua análise específica.

<b>Amostra</b>	<b>C fixo</b>	<b>Umidade</b>	<b>Granulometria média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Origem</b>
<b>C1</b>	54,8			
<b>C2</b>	59,6			
<b>C3</b>	65,3			
<b>U1</b>		1,1		
<b>U2</b>		2,9		
<b>U3</b>		4,8		
<b>G1</b>			70	
<b>G2</b>			119	
<b>G3</b>			162	
<b>AP</b>				Pó típico



**Figura 4.32** – Fotografia do recipiente plástico de armazenamento das amostras.

Na tabela IV.24 se encontra a divisão de amostra por ensaios. As amostras marcadas como “Analisado” são as analisadas pelos respectivos aparelhos. A seguir descreve-se a metodologia de ensaio para cada técnica utilizada.

**Tabela IV.24** – Divisão de amostra por ensaios a realizar pelas técnicas.

<b>Amostra</b>	<b>Análise Química</b>	<b>BET / Picnômetro</b>	<b>TGA/DTG</b>	<b>MEV</b>	<b>Simulador de ICP</b>
<b>C1</b>	Analisado	Analisado	Analisado		Analisado
<b>C2</b>	Analisado				Analisado
<b>C3</b>	Analisado	Analisado	Analisado		Analisado
<b>U1</b>	Analisado				Analisado
<b>U2</b>	Analisado				Analisado
<b>U3</b>	Analisado				Analisado
<b>G1</b>	Analisado	Analisado	Analisado		Analisado
<b>G2</b>	Analisado			Analisado	Analisado
<b>G3</b>	Analisado	Analisado	Analisado	Analisado	Analisado
<b>AP</b>	Analisado	Analisado		Analisado	Analisado

## **4.2 Análise química**

A análise química é dividida em:

### **4.2.1 Análise química imediata**

A caracterização imediata consiste em analisar a umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal. Todas as amostras possuem análise química imediata, feitas no laboratório da Calsete. O procedimento de análise química imediata da Calsete é uma adaptação da norma ABNT NBR8112 (Carvão vegetal – Análise imediata, de 1986), em base seca. Esta adaptação não modifica a confiabilidade dos resultados.

A análise química imediata consiste na preparação de amostra, determinação do teor de umidade, de cinzas, de matérias voláteis e por fim, através de diferença, o teor de carbono fixo.

A análise de umidade é feita levando o recipiente com a amostra em estufa, com temperatura previa de 105°C. Após a massa constante do recipiente com a amostra, retira-se e leva para o dessecador, para resfriar. Pesa novamente a amostra ( $m_1$ ). O teor de umidade do carvão vegetal é calculado pela equação (4.23).

$$TU = [(m_0 - m_1) / m_0] * 100 \quad (4.23)$$

TU = Teor de umidade, em %;

$m_0$  = massa inicial de amostra, em g;

$m_1$  = massa final da amostra, em g.

Para determinar o teor de cinzas coloca-se a amostra de 1g de carvão vegetal, em cadinho sem tampa, leva a mufla com temperatura em torno de 700°C, até a queima completa do carvão. Resfria-se o cadinho em dessecador e determina a massa final. A equação (4.24) é utilizada para o calculo do teor de cinzas.

$$CZ = [(m_1 - m_0) / m] * 100 \quad (4.24)$$

CZ = teor de cinzas, em %;

$m_0$  = massa do cadinho, em g;

$m_1$  = massa do cadinho + resíduo, em g;

$m$  = massa da amostra, em g.

A análise de matérias voláteis é feita com 1g de amostra desumidificada. Coloca-se a amostra em cadinho com tampa, e este na porta da mufla a 900°C por 3min. Após este tempo, coloca-se o cadinho dentro da mufla fechada por 7min. Resfria-se o cadinho em dessecador e determina a massa final. A equação (4.25) é utilizada para o cálculo do teor de materiais voláteis.

$$MV = [(m_2 - m_3) / m] * 100 \quad (4.25)$$

MV = Teor de matérias voláteis, em %;

$m_2$  = massa inicial do cadinho + amostra, em g;

$m_3$  = massa final do cadinho + resíduo, em g;

$m$  = massa da amostra, em g.

O valor do teor do carbono fixo é encontrado através da diferença dos valores de cinzas e matérias voláteis da amostra. Os cálculos são feitos pela equação (4.26).

$$C_{\text{fixo}} = 100 - MV - CZ \quad (4.26)$$

$C_{\text{fixo}}$  = teor de carbono fixo, em %;

MV = teor de matérias voláteis, em %;

CZ = teor de cinzas, em %.

Os ensaios foram repetidos e mostram desvio padrão abaixo do indicado pela norma.

A caracterização elementar do carvão vegetal foi efetuada no laboratório de análise Elementar do Departamento de Química da UFMG. O equipamento utilizado da marca Pekin Elmer, modelo PE 2400 CHN Analyzer, como mostra a figura 4.33. A determinação dos elementos C, H, N e feita com ajuda do “*Software Molecular Weight Calculator*”. A técnica referida implica em converter a amostra de material em gás e separa os elementos químicos. Após a separação esses gases elementares são medidos através da condutividade térmica, intrínseca de cada elemento. A amostra analisada foi a AP, sendo que foram executados somente dois ensaios por amostra, pois ficaram abaixo do desvio padrão.



**Figura 4.33** – Fotografia do equipamento utilizado para análise elementar, modelo PE 2400II CHN Analyzer, do departamento de química da UFMG.

### **4.3 Análise granulométrica**

Análise granulométrica divide a amostra por tamanho de partículas. Neste caso, se fez a separação por tamanho médio de grão por causa da influência deste na eficiência da taxa de injeção. Logo, a variação do tamanho médio é um parâmetro para análise de densidade, área superficial, porosidade e combustibilidade. Isto para posteriores comparações e conclusões.

A análise granulométrica foi feita no laboratório da Calsete. A norma utilizada para este ensaio é adaptação da ABNT NBR7402 (Carvão vegetal – Análise granulométrica, de 1982).

As malhas das peneiras são: 1,0mm, 0,50; 0,25; 0,21; 0,15; 0,105; 0,088; 0,074 e abaixo de 0,074mm. A amostra inicial para o estágio de análise granulométrica, já está caracterizada quimicamente. Esta amostra passa por uma peneira vibratória por 20min, utilizando as malhas referidas anteriormente. Após o ensaio, retira-se o carvão vegetal nos tamanhos médios a ser analisados, escolhido por conveniência técnica. Após a separação faz-se o quarteamento do carvão e retira 150g deste, o qual é colocado em recipiente plástico adequado para posteriores análises. Na tabela IV.24 são mostrados as variações de granulometria média das amostras utilizadas para os ensaios.

#### 4.4 Método de Adsorção de Nitrogênio - BET

O objetivo desta análise é identificar a porosidade e área superficial dos grãos de carvão vegetal, como visto na revisão bibliográfica, estes dois parâmetros influenciam na ICP. O aparelho da marca Quantachrome, modelo NOVA 1000, foi o usado para análise. Este equipamento do Núcleo de Valorização de Materiais Minerais do Departamento de Metalurgia - UFOP. Na figura 4.34 está mostrado um modelo de aparelho igual ao usado para os ensaios.



**Figura 4.34** – Fotografia do equipamento utilizado para análise de porosidade e área superficial, modelo NOVA 1000.

A sigla BET provem dos nomes dos cientistas que propuseram a técnica, Brunauer, Emmet & Teller. O procedimento operacional consiste primeiramente em se desgaseificar uma massa de 0,5g da amostra, submetendo-a e sob uma determinada temperatura, no caso 170°C, com o objetivo de eliminar possíveis contaminantes presentes. Em seguida se estabelecem valores desejados de pressão relativa durante o ensaio e a amostra, mantida à temperatura de ebulição do nitrogênio líquido (-196°C), é submetida a um pequeno fluxo de N<sub>2</sub> gasoso. Atingida a pressão relativa estabelecida, o volume de nitrogênio adsorvido na superfície é registrado e armazenado em computador.

O fenômeno de adsorção de N<sub>2</sub> é fortemente dependente das propriedades físicas do sólido, em particular de sua estrutura de poros. Assim, foram obtidas como resultado informações sobre área superficial específica, volume total de poros, tamanho médio

dos poros, distribuição de tamanhos de poros, volume de microporos, isotermas de adsorção - dessorção, de cuja forma se pode extrair informações sobre a forma geométrica dos poros. As amostras analisadas estão na tabela IV.24.

#### 4.5 Ensaio em Multipicnômetro a gás

O Multipicnômetro trata-se de um instrumento especificamente designado para medir o volume real de material sólido ou em pó, empregando o princípio de Arquimedes de deslocamento de um fluido. O equipamento usado para os ensaios é o mostrado na figura 4.35, da marca Quantachrome, modelo Ultrafon, totalmente automática e se encontra no mesmo departamento do BET.



**Figura 4.35** – Representação fotográfica do aparelho Picnômetro a gás utilizado para análise de densidade real.

Esse fluido é um gás capaz de penetrar em poros muito pequenos, e por isso se usa o gás Hélio, que em virtude de sua dimensão atômica, garante penetração em poros de ordem de  $1\text{Å}$  ( $10^{-10}\text{m}$ ). O multipicnômetro determina a densidade real através da diferença de pressão quando uma quantidade conhecida de gás Hélio sob pressão flui de um volume conhecido e calibrado de referência ( $V_r$ ) para o porta-amostra (de volume  $V_c$  conhecido e calibrado) contendo o material em pó (de volume  $V_p$ ). Ocorre uma queda de pressão de  $P_i$  (antes) para  $P_f$  (após passagem do volume  $V_r$  no circuito) e, a partir da relação entre essas pressões, determina-se o volume do material em pó ( $V_r$ ) pela equação (4.27):

$$V_p = (V_c - V_r) * [(P_1/P_2) - 1] \quad (4.27)$$

$V_p$  = Volume real do material analisado;  
 $V_c$  = Volume de referência do cadinho;  
 $V_r$  = Volume de referência do gás Hélio;  
 $P_1$  = Pressão inicial;  
 $P_2$  = Pressão final.

Conhecendo-se a massa do material ( $m_p$ ), mensurada em balança analítica de precisão, determina-se a densidade real ( $d$ ) pela equação (4.28):

$$d = m_p / V_p \quad (4.28)$$

$d$  = Densidade real do material analisado;  
 $m_p$  = Massa do material analisado;  
 $V_p$  = Volume real do material analisado.

O procedimento operacional do equipamento consiste em colocar a amostra no porta-amostra, que então é levado para uma estufa, para que se possa retirar toda a umidade. Depois desse processo concluído, a amostra é levada para o multiplicnômetro. Já no multiplicnômetro, é injetado o gás hélio na amostra para que este penetre nos poros da mesma e fornece a densidade real da amostra. Então o aparelho passa as informações para o computador e a impressora, onde são feitos os cálculos e apresentado os resultados. É feita repetições automáticas das análises até que os resultados estejam dentro da tolerância especificada pelo usuário. A tabela IV.24 mostrou as amostras utilizada para ensaios no multiplicnômetro.

#### **4.6 Análise Microscópica - MEV**

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado para análise pertence a UFOP e se encontra no prédio do DEGEO. Este MEV é o modelo JSM-5510, da marca Jeol, que pode ser visto na figura 4.36. Este equipamento possui sistema de reproduzir imagem até 300.000 vezes e possui acoplado um sistema EDS (energia Dispersiva de Raio-X).



**Figura 4.36** – Fotográfica do MEV utilizado para ensaios.

As amostras selecionadas para avaliação microscópica estão mostradas na tabela IV.24. Estas amostras foram selecionadas em função dos resultados de análise química e granulométrica, bem como o seu desempenho nos ensaios de combustão com elevado gradiente térmico.

A análise inicia-se com a preparação da amostra, em relação ao tamanho como a amostra já se encontrava no tamanho ideal. A quantidade utilizada foi de 10mg. O segundo passo foi metalizar a amostra. Uma alíquota mínima é adicionada a uma fita de dupla face de carbono, responsável pela condução e escoamento de elétrons do feixe do microscópio para o porta amostra, e subseqüentemente para o equipamento. Em seguida, através do uso de uma evaporadora de carbono, modelo JEE-4C, foi depositada uma camada nanométrica de carbono metálico sobre a amostra (não há controle de espessura exata da camada de carbono nesse tipo de equipamento).

A amostra já metalizada foi levada ao microscópio eletrônico, para digitalizar as imagens. Esses dados são tratados no software “*System six*” também do fabricante Thermo Noran.

#### 4.7 Análise de Termogravimetria – TGA/DTA

O equipamento usado foi o modelo SDT 2960, que possui sistema para análise DTA (Diferencial Thermal Analysis) e TGA (Thermal Gravimetric Analysis). O aparelho de análise utilizado encontra-se no laboratório de análise Térmica, do Departamento de Química do ICEB, que pode ser visto na figura 4.37. As análises neste equipamento tiveram como objetivo principal a análise de combustibilidade do carvão vegetal pulverizado, sob baixo gradiente térmico.

DTA (Análise Térmica Diferencial) mede fluxo de calor de uma amostra em função de temperatura e tempo. Qualquer reação do material que envolve mudanças com a variação de calor é captada pelo aparelho, ou seja, determina a variação da temperatura com as transformações físico-químicas, ligado a calor absorvida (endotérmica) ou liberada (exotérmica).

TGA (Análise termogravimétrica) mede mudanças de peso em um material em função de temperatura (ou tempo) debaixo de uma atmosfera controlada. Identifica mudanças de peso relacionado com volatilização de componentes de amostra, decomposição, oxidação / reações de redução, ou outras mudanças. Nos ensaios, as duas técnicas foram utilizadas juntas.



**Figura 4.37** – Representação fotográfica do equipamento de ensaio termogravimétrico, modelo SDT 2960, no DEQUI da UFOP

A preparação da amostra inicia-se na sua pulverização do material, que está dentro da granulometria padrão. Utilizou-se de 10mg para cada análise. Esta amostra é colocada em um cadinho de platina para ser introduzido no compartimento de análise. A taxa de

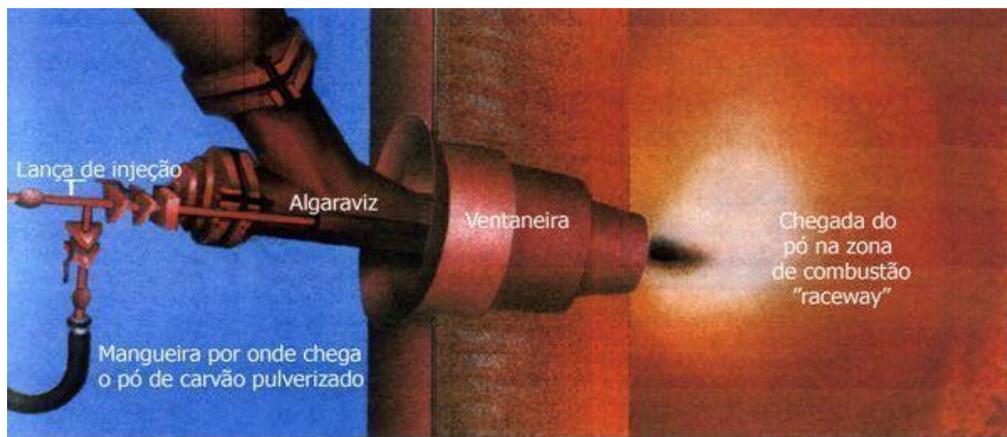
aquecimento de 25°C/min. Até uma temperatura de 1000°C, em uma vazão de ar de 50ml/min. As diferenças nas temperaturas características de um ensaio para outro não podem ultrapassar  $\pm 5^\circ\text{C}$ <sup>[59]</sup>. As amostras analisadas por essa técnica encontram-se na tabela IV.24.

#### 4.8 Simulador de injeção de materiais pulverizados no alto-forno

Sabe-se que a combustão do material pulverizado que é injetado nas ventaneiras do alto-forno é feita sob condições bastante severas, sobressaindo duas como sendo as mais importantes:

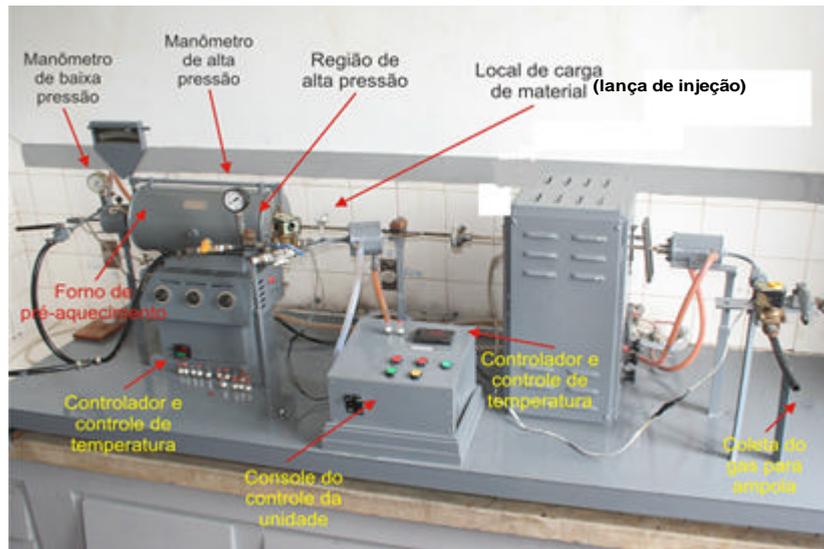
- Baixo tempo de residência da partícula no jato de gás no interior do alto-forno. Este tempo é da ordem de 20 a 50ms (=0,01 a 0,05s).
- Elevado gradiente térmico que o carvão pulverizado sofre quando é injetado nas ventaneiras. Este valor é da ordem de  $10^5\text{K/s}$ .

A figura 4.38 ilustra o ambiente ao qual se fala neste parágrafo.



**Figura 4.38** – Ambiente do alto-forno ao qual se refere ao estudo da qualidade do carvão vegetal<sup>[3]</sup>.

Estas condições podem ser simuladas em laboratório, sendo que atualmente existe na Escola de Minas da UFOP o laboratório de Siderurgia (LS) que dispõe de um equipamento que pode simular as condições identificadas anteriormente. A figura 4.39 mostra o equipamento existente no LS. Este equipamento já foi descrito em várias publicações nacionais e internacionais<sup>[16]</sup>. Os ensaios para se determinar o índice de combustão dos carvões vegetais pesquisados foram feitos nele.



**Figura 4.39** – Equipamento disponível no Laboratório de Siderurgia, da Escola de Minas, para simular a injeção de carvão pulverizado em altos-fornos.

Pode-se dividir o aparelho em duas zonas uma de alta pressão e outra de baixa pressão. A zona de baixa pressão é composta pelo forno de pré-aquecimento que simula as condições do regenerador de calor de um alto-forno, o ponto de injeção de carvão e o forno de combustão que simula a zona de combustão ou “*raceway zone*”. A zona de alta pressão é composta por um manômetro e a lança de injeção, sendo ativada por uma válvula eletromagnética. Todas estas zonas juntas representam as condições físicas de operação e combustão de carvão em um alto-forno. Na zona de alta-pressão se carrega o carvão pulverizado. O gás produzido é coletado e analisado e daí existe o cálculo do índice de combustão o qual é representado abaixo.

$$IC = (\%CO + \%CO_2) \cdot n / [(m_a \cdot \%C_f / 1200000) - (\%CH_4 \cdot n_g / 100)] \quad (4.29)$$

Em base úmida;

Onde

IC = Índice de combustão (combustibilidade);

%CO, %CO<sub>2</sub>, %CH<sub>4</sub> = Porcentagens dos gases produzidos;

%C<sub>f</sub> = Carbono fixo contido na amostra;

n<sub>g</sub> = Número de mols do gás depois da experiência;

m<sub>a</sub> = Massa da amostra de carbono injetada em miligramas.

Pode-se dividir o aparelho em seções com vista na Figura 4.41:

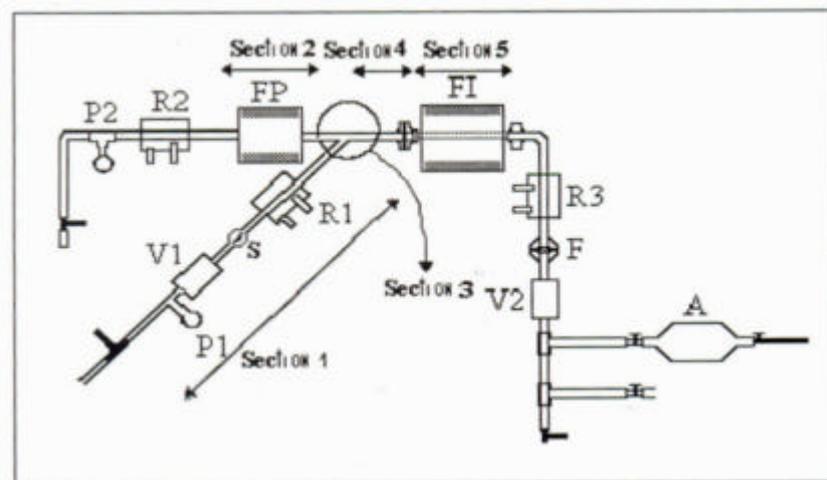
Seção1: Lança de injeção;

Seção2: Regenerador;

Seção3: Ponto de injeção na zona de baixa pressão;

Seção4: Ventaneira;

Seção5: Zona de combustão.



**Figura 4.40** – Desenho esquemático das regiões do simulador apresentado na figura 4.39.

O aparelho utiliza dois fornos, um de pré-aquecimento e um que simula a zona de combustão. O forno de pré-aquecimento (FP) consiste em um forno elétrico do tipo Kanthal operado com uma variação de temperatura de 0 a 1250°C. A temperatura do forno é monitorada por um controle digital de temperatura, ativado por um termopar. A câmara de reação do forno é composta por um tubo de aproximadamente 41,5cm de comprimento e 7,5cm de diâmetro, a câmara de reação é de aço inoxidável. O objetivo principal deste forno é fornecer calor ao oxigênio (em torno de 1000°C) simulando a temperatura de sopro do alto-forno. O segundo forno (FI) é um forno elétrico capaz de operar a temperaturas acima de 1500°C, sendo monitorado por um controlador digital de temperatura ativado por um termopar, a finalidade deste forno é simular as características da zona de combustão de um alto-forno.

Próximo à entrada do forno de pré-aquecimento existe um manômetro (P2) para ajustar e monitorar a pressão do gás, logo após este, existe um dispositivo de resfriamento (R2)

operado com água para assegurar que o calor de dentro do forno de pré-aquecimento não seja conduzido ao gás antes dele chegar ao interior deste. Os dois fornos e a lança de injeção são interligados como mostra a figura 4.40 acima por tubos de aço inoxidável, sendo que no interior do forno de combustão existe um tubo de quartzo para resistir às altas temperaturas atingidas no interior deste.

No fim do tubo do forno de combustão existe um filtro (F) para remover a parcela do material que não queimado e encaminhar o gás para a válvula eletromagnética (V2) a qual emite um pulso que encaminha o gás para ser coletado em uma ampola de vidro (A) para posterior análise no ORSAT o dispositivo de resfriamento (R3) protege a ampola e a válvula de um possível aquecimento devido ao calor conduzido pelo tubo de aço que está ligado ao forno de combustão.

A lança de injeção é um tubo de aço inoxidável acoplada aos dois fornos por um angulo de  $32^\circ$  como mostra a seção 3 a uma distância de 15cm da entrada do forno de combustão, esta lança consiste dos seguintes componentes: Um regulador de precisão para gases (P1) que monitora a pressão do gás o qual irá carregar as partículas de material injetado, próximo a este regulador existe uma válvula eletromagnética (V1) que impulsiona o gás a ser injetado como acontece em um alto-forno, o dispositivo (R1) tem a mesma finalidade que o (R2) e o (R3).O material a ser injetado é introduzido no sistema através de uma abertura de 0,4cm de diâmetro identificado por “S”.

A metodologia usada inicia-se com a identificação da amostras de carvão vegetal, as quais são pesadas em balança analítica para compor uma amostra em torno de 60 a 200mg e colocada com a ajuda de uma espátula em um recipiente de vidro devidamente desumidificado com auxilio de acetona, então esta é levada para o simulador. O gás utilizado neste experimento é oxigênio puro estocado em cilindros de  $13\text{m}^3$  cada, este é acoplado ao simulador através de mangueiras devidamente dimensionadas para tal finalidade, com o auxilio de um funil de vidro o carvão é introduzido na abertura denominada “S” que após isso é fechada para que não ocorra a injeção do material, cada forno este previamente aquecido a temperatura de  $800^\circ\text{C}$  para o forno de pré-aquecimento e acima de  $1200^\circ\text{C}$  para o forno de combustão.

Após aberta a válvula do cilindro, o gás é destinado para um ramo da mangueira que o conduz ao forno de pré-aquecimento e outro que o conduz para a lança de injeção no forno de pré-aquecimento onde ele é aquecido para a temperatura de sopro similar a atingida em um alto-forno. Na lança de injeção o gás arrasta o material particulado sob o comando da válvula eletromagnética (V1) que é acionada simultaneamente com a válvula (V2) por apenas 2 segundos repetindo este acionamento por 4 vezes. As pressões do gás nos reguladores (P1) e (P2) são respectivamente  $5\text{kgf/cm}^2$  e  $2\text{kgf/cm}^2$ .

O gás em alta pressão, no momento de sua liberação, cria uma onda de choque, arrastando as partículas do material injetado entra em contato com o gás vindo do forno de pré-aquecimento e entram juntos no forno de combustão onde acontece a queima sendo depois separados o particulado e o gás coletado nas ampolas.

As ampolas são de vidro com duas aberturas uma em cada extremidade e um volume interno variando entre 200 e 250ml, como pode ser visto na Figura 4.41 preenchida com água destilada e um corante, à medida que o gás entra na ampola ele expulsa a água por outra extremidade, logo após o gás ser coletado ele é encaminhado ao analisador de gás ORSAT.



**Figura 4.41** - Vista geral da ampola de vidro.

O analisador de gás ORSAT, figura 4.42, trata-se de um conjunto de ampolas de vidro contendo em seu interior as devidas soluções necessárias para análise do gás. Este sistema é interligado por tubos de vidro por onde o gás é forçado a passar gerando assim

uma lavagem separando as devidas frações de CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, as soluções utilizadas são de cloreto de cobre para o CO, Pirogalol para o O<sub>2</sub> e hidróxido de potássio para o CO<sub>2</sub>. Através de um tubo contendo uma solução salina e pela diferença de nível entre este e as ampolas de soluções pode-se medir a porcentagem de cada gás que compõem a amostra.



**Figura 4.42** - Vista geral do analisador de gás ORSAT.

O gás coletado no Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados é ligado por uma mangueira de borracha ao ORSAT, após aberta a válvula da ampola o gás é conduzido por esta mangueira até a válvula de entrada do ORSAT onde pode ser direcionado para cada ampola, como desejar. Escolhida a ampola de solução a ser utilizada o gás é forçado a passar por esta, por uma diferença de nível entre a solução salina e a ampola separando assim a fração de gás que a solução esta especificada para separar, após este procedimento se expulsa o gás desta ampola e fecha a válvula que fornece o caminho para esta, repetindo o procedimento para as outras ampolas.

A quantidade de cada amostra varia de 60 a 200mg de carvão vegetal pulverizado. As mesmas são colocadas em recipientes específicos (vidraria), preparados para receber as quantidades de cada material a ser testado. Este recipiente pode ser visto na figura 4.43. As quantidades a serem ensaiadas serão determinadas em função da equação 4.29<sup>[51]</sup>. Usando uma balança analítica de precisão (0,0001g) do departamento de química da UFOP e usando acetona, as amostras serão pesadas com a precisão necessária. O uso da acetona se mostrou extremamente eficiente em ensaios anteriores para evitar aderência do carvão vegetal nos recipientes de vidraria para ensaios.



**Figura 4.43** – Recipiente usado para armazenar o carvão pulverizado para o ensaio de combustão.

A tabela IV.25 identifica as variáveis e as amostras a serem simuladas para o ensaio de combustão com elevado gradiente térmico. Além destas variáveis concernentes a qualidade do carvão vegetal, ensaios de variação de taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado são analisados.

**Tabela IV.25** – Divisão de ensaios por amostra para ICP, E<sub>O2</sub> (%) = 0.

<b>Amostra</b>	<b>Origem (Análise)</b>	<b>TIP (kg/t gusa)</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
<b>C1</b>	54,8% Cf	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>C2</b>	59,6% Cf	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>C3</b>	65,3% Cf	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>U1</b>	1,1% Umid.	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>U2</b>	2,9% Umid.	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>U3</b>	4,8% Umid.	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>G1</b>	70µm	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>G2</b>	119µm	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>G3</b>	162µm	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg
<b>AP</b>	Pó típico*	60	80mg	80mg
		100	100mg	100mg
		120	120mg	120mg

\* Pó utilizado para ICP na Calsete com granulometria de 80 % < 200 mesh

Os resultados dos ensaios, cujo valor tiver uma variação superior a 3% deverão ser repetidos.

## 5. Resultados e Discussões

Os resultados foram divididos em caracterização do carvão vegetal, simulação de combustão de carvão vegetal pulverizado e coleta de dados industriais referente à ICP. Os dois primeiros referem-se à rota de laboratório e o último a rota industrial. O carvão vegetal pulverizado utilizado para análises laboratoriais é o mesmo do industrial.

Para caracterização foram utilizados ensaios e equipamentos, os quais foram descritos no item 4. A tabela V.26 apresenta dados operacionais dos altos-fornos 1 e 2 da Siderúrgica Calsete, dados referentes ao alto-forno e ICP.

**Tabela V.26** – Características dos Altos-fornos e ICP da Calsete.

Dados	Unidade	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2
Temperatura de Sopros	°C	730	730
Relação Minério/Carvão	kg/kg	2,20	2,30
Taxa de Injeção	kg/t gusa	92	70
Taxa de carbono	kg/t gusa	58	44
Taxa de substituição	kg/kg	0,95	0,95
Enriquecimento de O <sub>2</sub>	%	1	1

As caracterizações químicas foram análise imediata e elementar, representadas na tabela V.27. Essa tabela fornece a granulometria média de todas as amostras utilizadas para os ensaios. Procurou-se estabelecer variações de granulometria, carbono fixo e umidade. Levando em consideração valores próximos ao real, trabalhado em empresas siderúrgicas a carvão vegetal. A identificação das amostras representa esses parâmetros; C1, C2 e C3 – variações de carbono fixo, U1, U2 e U3 – variações de umidade e G1, G2 e G3 – variações de granulometria. AP representa o carvão vegetal beneficiado utilizado na instalação de ICP da Calsete.

**Tabela V.27** – Representação da análise química e granulométrica do carvão vegetal caracterizado.

Amostra	Análise imediata; base seca				Análise elementar				Granulometria média (mm)
	Cf (%)	TU (%)	MV (%)	CZ (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	
<b>C1</b>	54,8	1,4	24,2	21,0					0,070
<b>C2</b>	59,6	1,4	24,6	15,8					0,072
<b>C3</b>	65,3	1,4	24,1	10,6					0,068
<b>U1</b>	59,6	1,1	24,6	15,8					0,070
<b>U2</b>	59,6	2,9	24,6	15,8					0,072
<b>U3</b>	59,6	4,8	24,6	15,8					0,070
<b>G1</b>	60,1	1,5	24,4	15,5					0,070
<b>G2</b>	59,8	1,5	24,3	15,9					0,119
<b>G3</b>	60,9	1,5	24,4	14,7					0,162
<b>AP</b>	60,1	1,6	24,2	15,7	66,67	2,54	0,81	29,98	0,073

A utilização do BET proporcionou a determinação de várias propriedades físicas. Destaque para a superfície específica, volume total de poros e volume de microporos das amostras. Esses dados podem ser vistos na tabela V.28.

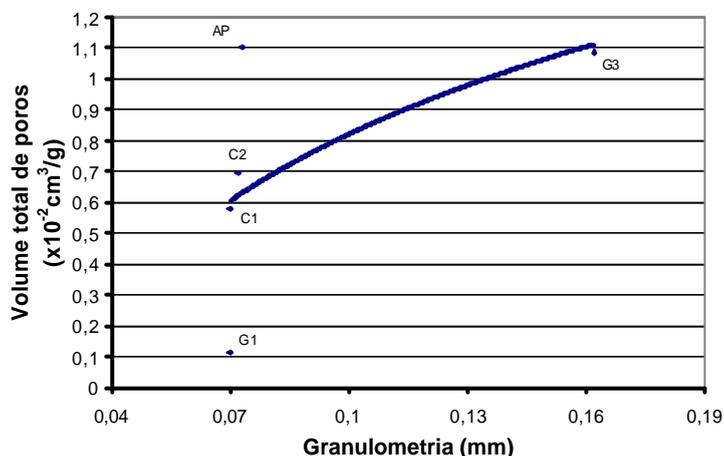
**Tabela V.28** – Resultados de parâmetros de porosidade e densidade real de carvão vegetal.

Amostra	Superfície Específica	Volume total de poros	Volume de microporo* ( $\rho_m < 2\mu\text{m}$ )	Área dos microporo*	Diâmetro médio de poros	Tamanho máximo de poros	Densidade
Unidade	$\text{m}^2/\text{g}$	$10^{-2}\text{cm}^3/\text{g}$	$\times 10^{-3}\text{cm}^3/\text{g}$	$\text{m}^2/\text{g}$	?	?	$\text{g}/\text{cm}^3$
<b>C1</b>	1,861	0,5804	0,7991	2,262	120,48	2918,6	1,512
<b>C2</b>	1,729	0,6945	0,7995	2,264	160,07	1342,8	1,504
<b>G1</b>	1,367	0,1143	0,7453	2,110	330,44	1795,4	1,597
<b>G3</b>	2,171	1,086	1,0119	2,885	200,00	1466,8	1,539
<b>AP</b>	2,442	1,102	1,057	2,993	180,05	2278,1	1,555

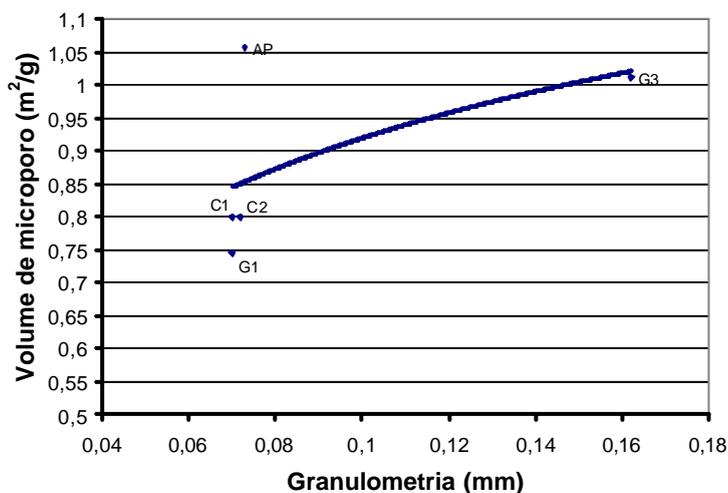
\* Classificação de microporo é por diâmetro ( $\rho_m < 2\mu\text{m}$ ) de poro e macróporo ( $\rho_m > 50\mu\text{m}$ ) segundo a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

As figuras 5.44 a 5.47 representam a relação de granulometria com os dados fornecidos pela tabela V.28. Observe que todas as propriedades (superfície específica, volume total de poros, volume de microporo e área dos microporos) apresentam aumento com a granulometria.

O aumento do volume de poros e microporos com a granulometria, mostrado nas figuras 5.45 e 5.46 respectivamente, pode ser explicado pela estrutura do carvão vegetal. A madeira, matéria-prima para produção de carvão vegetal, possui células fibrosas com vasos condutores onde se encontram cavidades. Essas cavidades irão gerar os poros na carbonização. Mesmo com a diminuição de poros, por contração da madeira durante a carbonização, o carvão vegetal pode ainda chegar a apresentar 80% de porosidade em seu volume<sup>[5]</sup>.

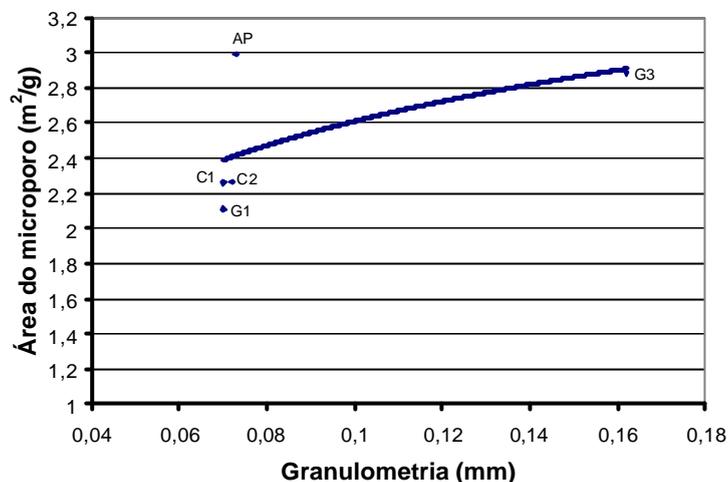


**Figura 5.44** – Relação entre granulometria média e volume total de poros.



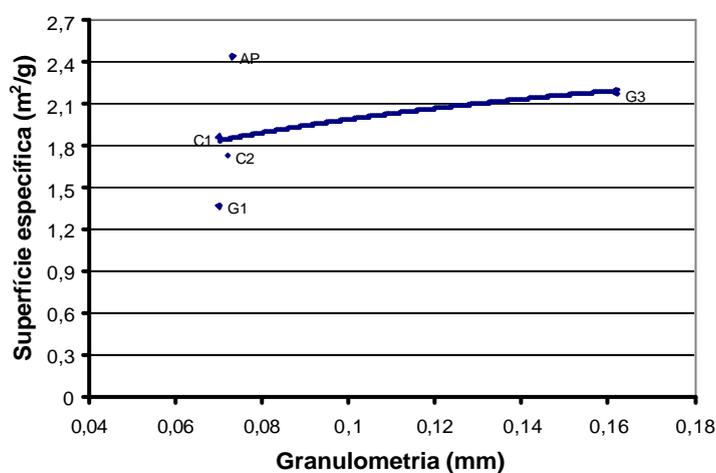
**Figura 5.45** – Relação entre granulometria média e volume de microporos.

Como a quantidade de microporos crescendo, isto acarretará um aumento da área de microporos. Desta forma a relação entre a área dos microporos aumentará com a granulometria, o que pode ser observado na figura 5.46.



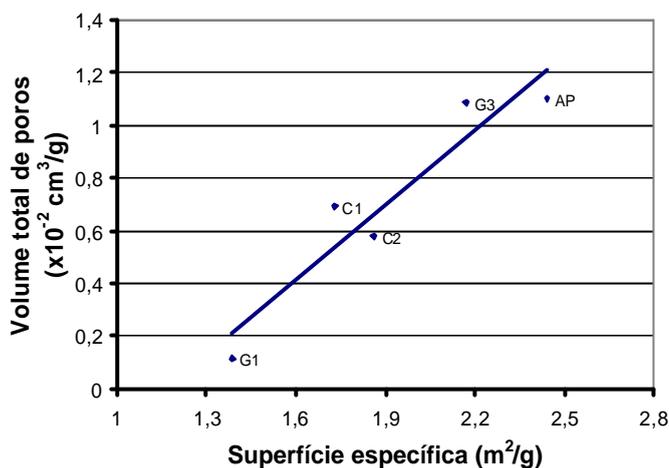
**Figura 5.46** – Relação entre granulometria média e área dos microporos.

Na figura 5.47 mostra-se a relação de granulometria com superfície específica. Por definição a superfície específica é a área superficial por unidade de peso de carvão vegetal ( $\text{cm}^2/\text{g}$  ou  $\text{m}^2/\text{kg}$ ). Neste caso levou-se em consideração a superfície dos poros para os cálculos. Observou-se um aumento da quantidade de poros (figura 5.44 e 5.45) e da área de microporos (5.46) com a granulometria. Isto por causa da estrutura porosa do carvão vegetal, implicando também no aumento da superfície específica com a granulometria.

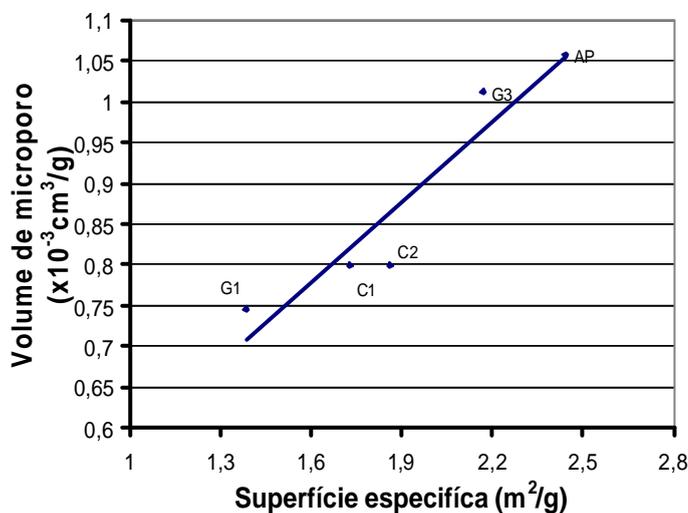


**Figura 5.47** – Relação entre granulometria médio e superfície específica.

Analisando o que foi explanado anteriormente, os volumes de poros e microporos aumentam juntos com a superfície específica do carvão pulverizado. Isto fica claro nas figuras 5.48 e 5.49, que representam as relações entre granulometria versus volume de poros e granulometria versus volume de microporos, respectivamente.



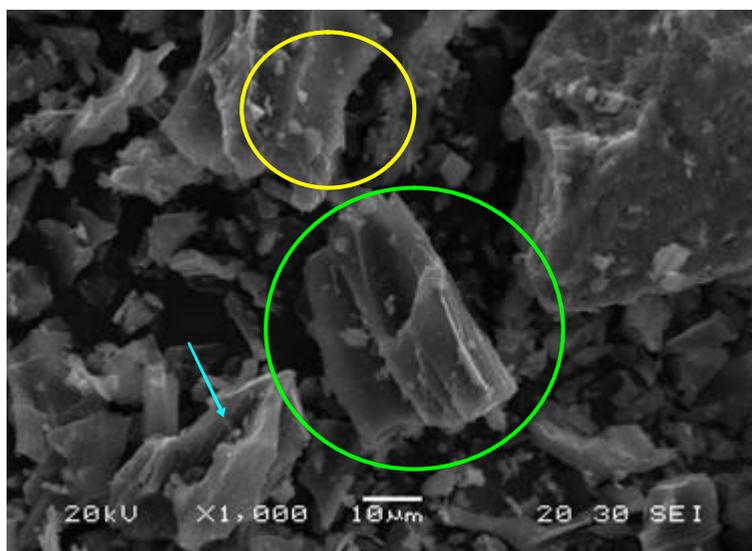
**Figura 5.48** – Relação entre superfície específica e volume de poros.



**Figura 5.49** – Relação entre superfície específica e volume de microporos.

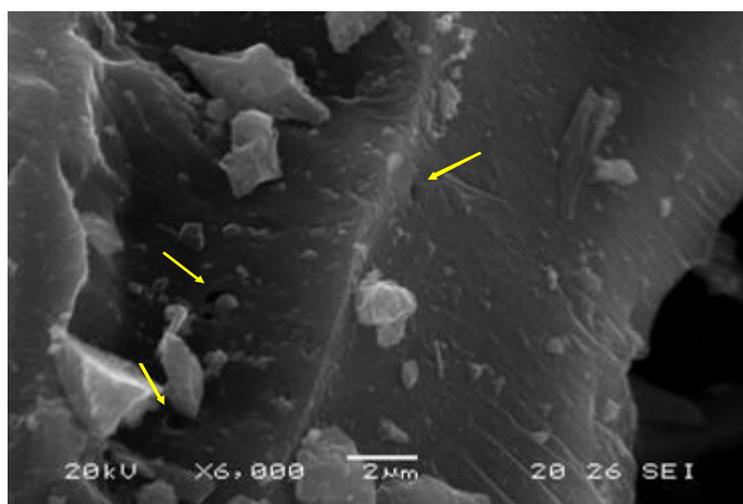
A estrutura física do carvão vegetal pulverizado pode ser vista nas figuras 5.50 a 5.54 através da digitalização feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV), os aumentos foram de 500x, 1.000x e 6.000x em relação ao tamanho real.

As figuras 5.50 e 5.51 representam a mesma amostra (G2), diferença está no aumento de 1.000x e 6.000x respectivamente. Na figura 5.50 a seta azul mostra cavidades em uma partícula. Essa cavidade é identificada como um tipo de poro. O círculo verde representa uma partícula com estrutura lamelar, que é característico do carvão vegetal.



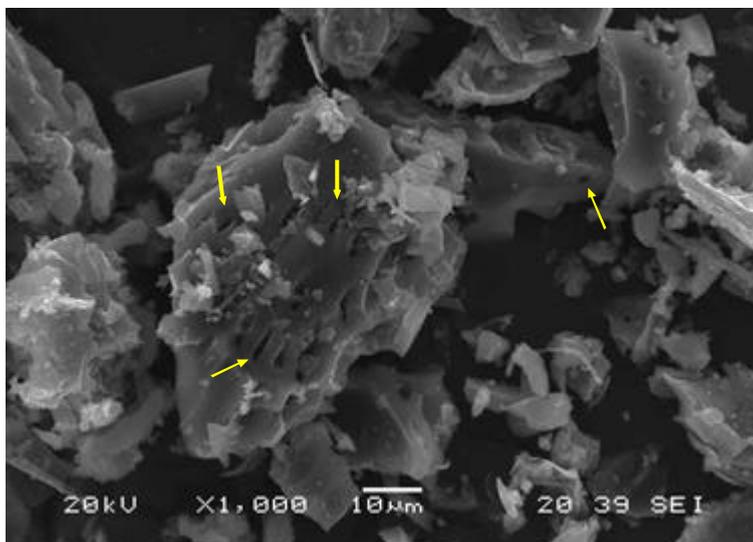
**Figura 5.50** – Representação fotográfica de MEV, da amostra G2.

Quando aproxima a fotografia na partícula (círculo amarelo) da figura 5.50, apresentado pela figura 5.51. Notam-se pequenos “pontos pretos”, indicado pelas setas amarelas, na estrutura lamelar do carvão vegetal. Esses “pontos pretos” são poros, talvez microporos, na partícula.

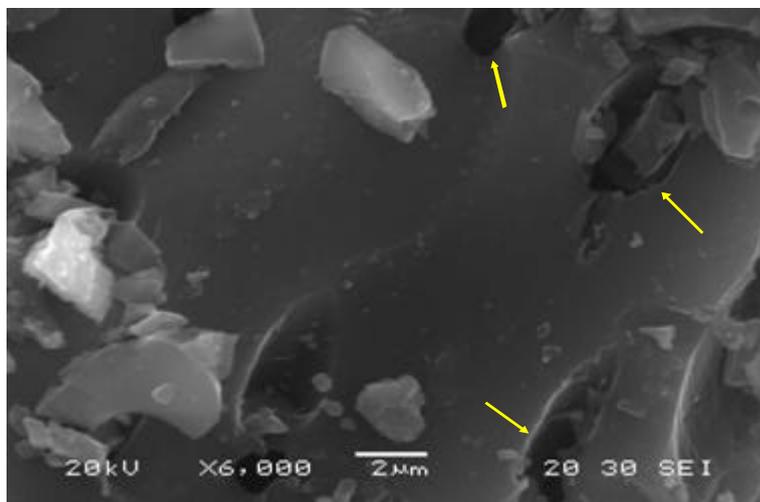


**Figura 5.51** – Representação fotográfica de MEV, da amostra G2.

A figura 5.53 é um aumento da figura 5.52, a qual mostra poros mais nitidamente e sua estrutura lamelar, indicado pelas setas amarelas. A figura 5.52 mostra uma partícula com grande quantidade de poros, característica do carvão vegetal.

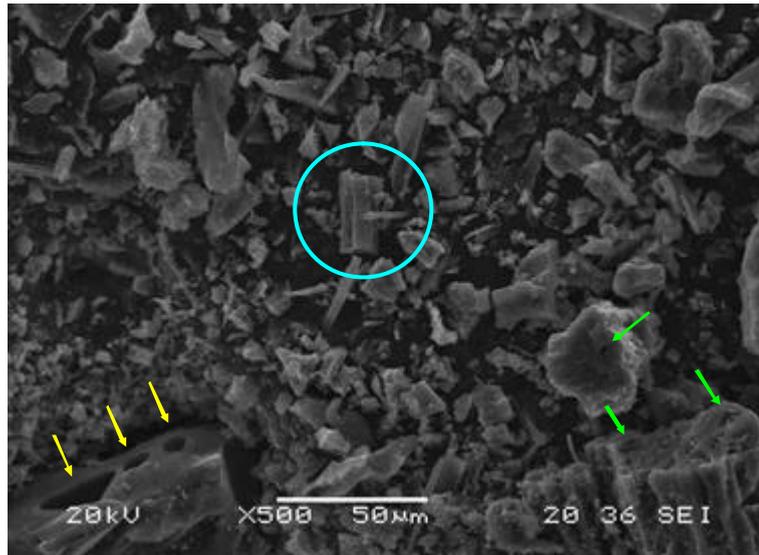


**Figura 5.52** – Representação fotográfica de MEV, da amostra AP.



**Figura 5.53** – Representação fotográfica de MEV, da amostra AP.

As características comentadas anteriormente aparecem na figura 5.54, estrutura lamelar e poros. Uma característica diferente chama atenção nesta figura, é a segregação do carvão vegetal pulverizado. Isto influencia na combustibilidade dentro da zona de combustão.



**Figura 5.54** – Representação fotográfica de MEV, da amostra G3.

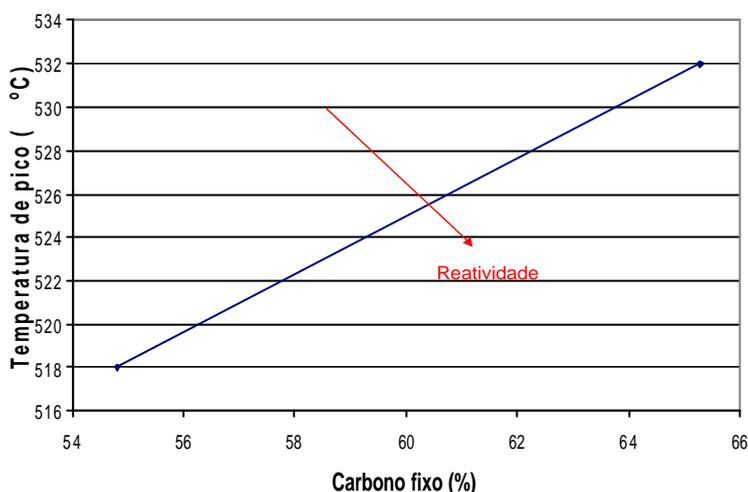
Autores têm utilizado de técnica de TGA, através da derivada da curva encontrada (DTG), para achar reatividade de carvão ( $R_{m\acute{a}x.}$ ). Outros parâmetros são analisados, o mais importante é o  $T_p$  (Temperatura de pico), este exprime a temperatura máxima de reatividade, ou seja, perda de massa. Os outros são temperatura inicial ( $T_i$ ) de perda de massa após perda de umidade e  $T_b$  temperatura de “*burnout*” ou de término da queima de carbono. Neste trabalho o parâmetro considerado foi a  $T_p$ .

De acordo com a bibliografia<sup>[59]</sup>, quanto menor  $T_p$  maior serão as reatividades ( $R_{m\acute{a}x.}$ ) e o índice de combustão (IC). Sendo assim, a tabela V.29 apresenta quatro amostras analisadas. As figuras 5.55 e 5.56 representam a relação entre carbono fixo versus temperatura de pico e granulometria versus temperatura de pico, respectivamente.

**Tabela V.29** – Dados da análise de carvão vegetal utilizando a técnica de TGA.

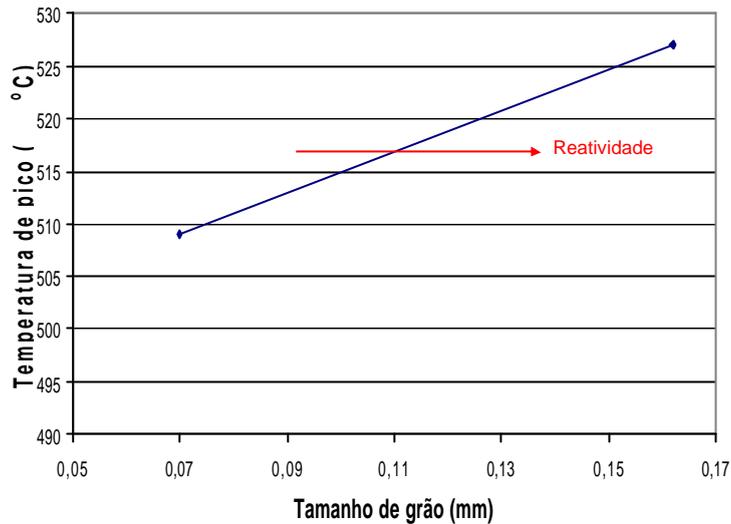
<b>Amostra</b>	<b><math>T_p</math> (°C)</b>
<b>C1</b>	518
<b>C3</b>	532
<b>G1</b>	509
<b>G3</b>	527

A figura 5.55 mostra a temperatura de pico subindo com o aumento do carbono fixo do carvão. Isto não está coerente com a revisão bibliográfica aqui descrita, pois analisando a tabela V.27 que fornece a análise química imediata da amostra C1 e C3, observa-se que as diferenças existentes são no carbono fixo e cinzas. O carbono fixo aumentando, no caso do carvão vegetal, acarreta aumento no índice de combustão e reatividade, ou seja, diminuição da temperatura de pico. No caso do teor de cinzas, não houve influência significativa na temperatura de pico, isto por causa da temperatura de ensaio, a qual é máxima em 1000°C para uma taxa de 25°C/min (que representa 200.000 vezes menor do que o que ocorre na zona de combustão).



**Figura 5.55** – Relação entre carbono fixo e temperatura de pico (Tp), calculada pela técnica de TGA.

A revisão bibliográfica mostra que com aumento da granulometria, nas condições da zona de combustão do alto-forno, o índice de combustão e a reatividade diminuem. A velocidade de reação de combustão é mais eficiente, quanto maior o contato entre partícula e o gás O<sub>2</sub>, para um mesmo tipo de carvão. Neste caso aumentando a granulometria, a área de contato irá diminuir, acarretando a diminuição da eficiência de combustão. O problema é que de acordo com os ensaios, a superfície específica está aumentando com a granulometria, por causa do crescimento da porosidade (figura 5.47). Logo comparando o ensaio de combustibilidade, representado pela figura 5.59, a figura 5.56 deveria apresentar temperatura de pico praticamente constante, o que não acontece.



**Figura 5.56** – Relação entre granulometria e temperatura de pico (Tp), calculada pela técnica de TGA.

Usando um equipamento de combustão, que simula as condições da ‘*raceway*’, foi calculado o índice de combustão (IC) para várias amostras. Utilizou-se de três taxas de injeções distintas (60kg/t gusa, 100kg/t gusa e 120kg/t gusa), esse valores foram escolhidos por causa das taxas utilizadas operacionalmente e capacidade das instalações implantadas nas maiorias das empresas. Parâmetros químico e físico do carvão vegetal pulverizado foram utilizados para relacionar suas características com o índice de combustão. Esses resultados podem ser vistos na tabela V.30.

As figuras 5.57 a 5.63 representam relações de dados da tabela V.30 com os dados das tabelas V.26, V.27 e V.28. Esses gráficos produzidos podem ser divididos em dois grupos. O primeiro são as figuras 5.57 a 5.60, que relacionam taxa de injeção (TIP), índice de combustão (IC) com carbono fixo, umidade e granulometria. O outro são as figuras 5.61 a 5.63, representando as relações de taxa de injeção, índice de combustibilidade com porosidade e superfície específica.

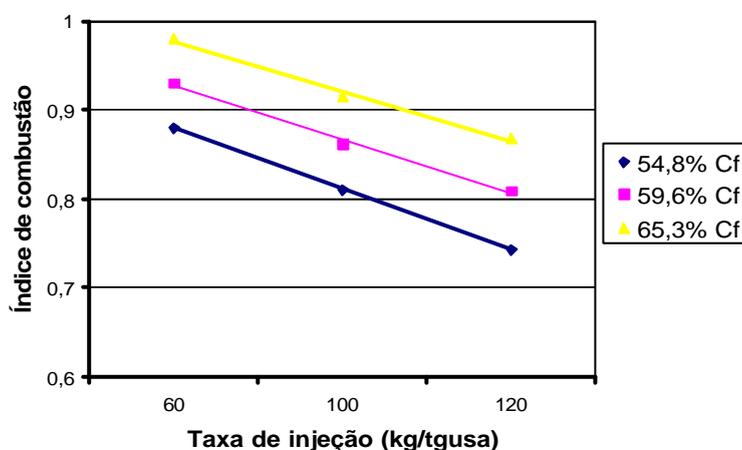
**Tabela V.30** – Resultados dos ensaios de combustão com elevado gradiente térmico; temperatura de sopro constante de 800°C.

<b>Amostra</b>	<b>Origem (Análise)</b>	<b>Taxa de Injeção (kg/t gusa)</b>	<b>Índice de combustão</b>
<b>C1</b>	54,8% Cf	60	0,880
		100	0,810
		120	0,743
<b>C2</b>	59,6% Cf	60	0,930
		100	0,861
		120	0,809
<b>C3</b>	65,3% Cf	60	0,981
		100	0,916
		120	0,868
<b>U1</b>	1,1% Umid.	60	0,920
		100	0,857
		120	0,803
<b>U2</b>	2,9% Umid.	60	0,948
		100	0,891
		120	0,834
<b>U3</b>	4,8% Umid.	60	0,980
		100	0,920
		120	0,864
<b>G1</b>	70 µm	60	0,950
		100	0,884
		120	0,816
<b>G2</b>	119 µm	60	0,949
		100	0,882
		120	0,820
<b>G3</b>	162 µm	60	0,946
		100	0,872
		120	0,806
<b>AP</b>	73 µm	60	0,952
		100	0,882
		120	0,819

As figuras 5.57 a 5.60 mostram que aumentando a taxa de injeção, o índice de combustão diminuirá isto é influenciado principalmente pelas condições extremamente severas e do oxigênio presente na “raceway”. Esses parâmetros influenciam

negativamente na eficiência de combustão. Isto pode ser explicado pela menor relação O/C presentes na zona de combustão, portanto gerando uma menor taxa.

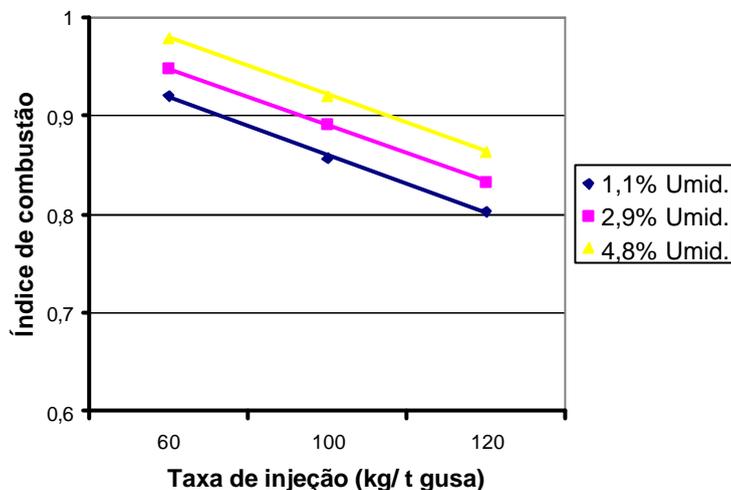
A relação do carbono fixo, com o índice de combustão e taxa de injeção são representadas na figura 5.57. Observe que o carbono fixo aumentando o IC e TIP aumentam também. Isto está coerente com a literatura, pois o aumento do carbono fixo provocará aumento da reatividade do carvão vegetal, o que não foi comprovado pelo TGA (figura 5.55), melhorando a combustibilidade. Observa-se através da tabela V.27 que os materiais voláteis permanecem praticamente iguais, variando somente a cinzas. As matérias voláteis neste caso não influenciam nos parâmetros, ou seja, aumento da cinzas com uma diminuição de carbono fixo. De acordo com a bibliografia estudada, as cinzas prejudicam a combustibilidade. Maior taxa de injeção implica em menor relação O/C, portanto menor índice de combustão. Neste caso, não houve influência, pois a relação O/C não é menor que 2 para as taxas de injeção praticadas. Por outro lado, quando se eleva o teor de carbono fixo, aumenta-se a concentração de carbono que pode reagir com  $O_2$ , portanto favorecendo o índice de combustão.



**Figura 5.57** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando carbono fixo.

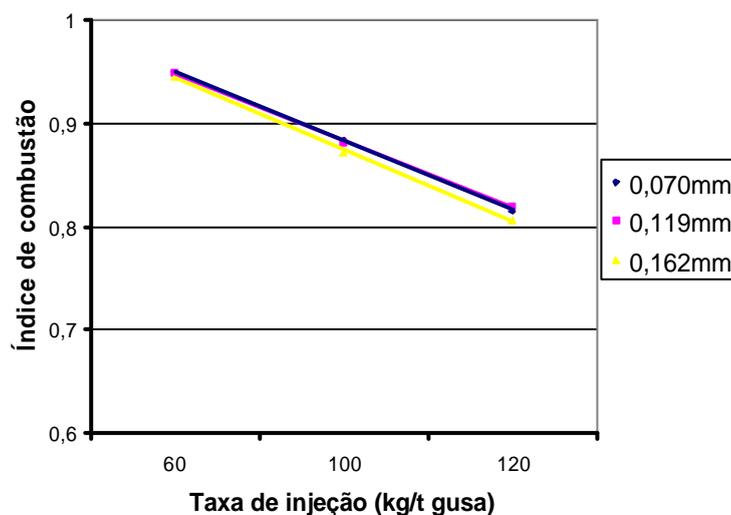
A figura 5.58 representa as variações de umidade com o IC e TIP. Neste caso, a análise imediata das amostras são praticamente iguais, não havendo interferência desses parâmetros nos resultados. Suas granulometrias idênticas e dentro da faixa desejada para ICP ( $70\mu m$ ), não provocarão interferências nos resultados. A explicação para o aumento do índice de combustão com a umidade está no fato de que a água presente no carvão vegetal irá evaporar primeiro que a reação de combustão do carvão vegetal (temperatura de sopro baixa de  $800^{\circ}C$ ), provocando uma degradação granulométrica do carvão, ou

seja, diminuindo o tamanho das partículas ajudando assim a melhorar a performance da combustão. Ou seja, aumento da umidade do carvão provocaria uma degradação do carvão vegetal, impingindo maiores taxas de queima.



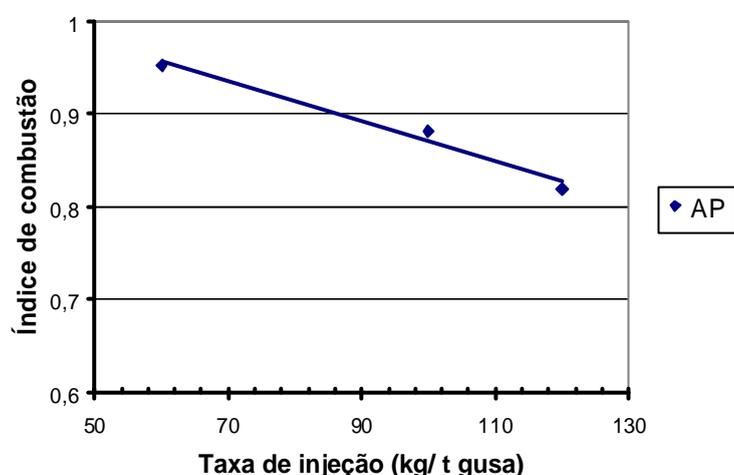
**Figura 5.58** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando umidade de carvão.

No caso da figura 5.59, observa-se que um aumento de granulometria existe uma leve diminuição do índice de combustão, para uma mesma taxa de injeção de carvão pulverizado. Economicamente isto pode ser sensível durante a etapa de moagem do carvão vegetal, pois passar a granulometria de 162 $\mu$ m para 70 $\mu$ m é de alto custo e sem melhoria de combustibilidade. Isto mostra que ao trabalhar com granulometria média acima do estabelecido por muitos autores (70 $\mu$ m) pode ser viável, nessas condições propostas no gráfico.



**Figura 5.59** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando granulometria e a taxa de injeção.

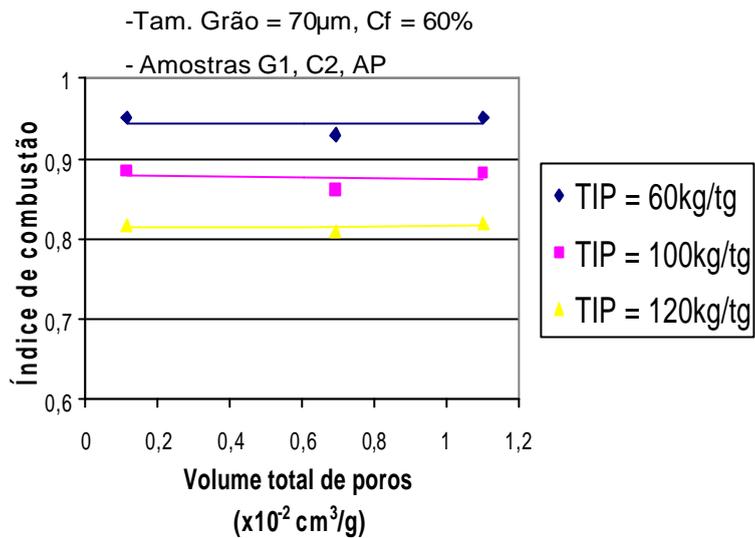
A figura 5.60 faz se uma análise do carvão pulverizado beneficiado, usado para ICP da Calsete. Observa-se uma queda de IC com o aumento da TIP, o que está coerente com a revisão bibliográfica. Pode-se analisar o índice de combustão dos altos-fornos da Calsete. Através da tabela V.26 onde existe a taxa de injeção operacional do alto-forno 1 (de 92kg/t gusa) e o alto-forno 2 (com 70kg/t gusa). Fazendo uma interpolação teremos IC de 0,896 e 0,935 respectivamente. O índice de combustão depende de vários fatores para definir sua eficiência para o alto-forno. Desta forma, a IC é uma característica peculiar de cada alto-forno, ou seja, cada um possui o índice de combustão ideal para sua própria marcha.



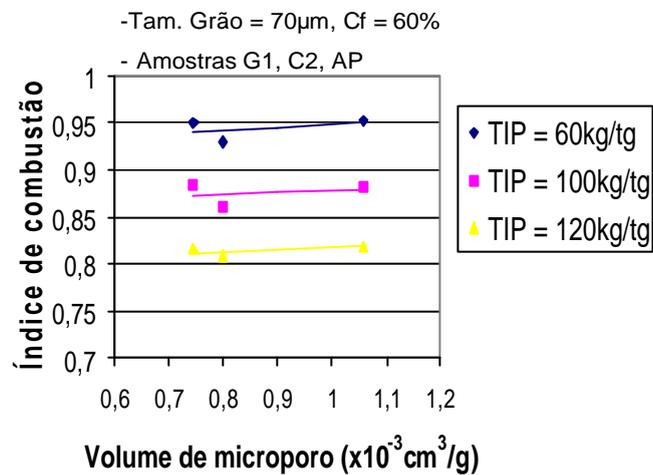
**Figura 5.60** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, para o carvão beneficiado usado para ICP, na Calsete.

As figuras 5.61 a 5.63 representam as relações de parâmetros do carvão analisado no BET, com o índice de combustibilidade e taxa de injeção, mantendo constante o carbono fixo e granulometria. Observou-se que não houve variações significativas dos IC e TIP com esses parâmetros característicos do carvão vegetal.

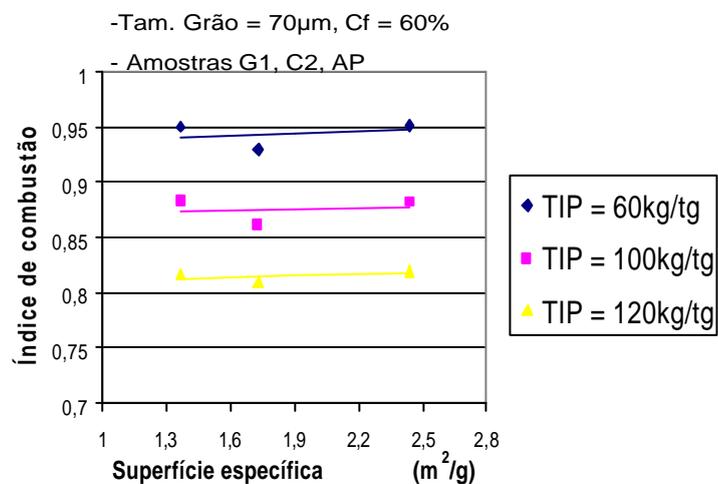
A figura 5.61 representa a relação entre volume total de poros com o taxa combustão, mostrando uma pequena variação de IC com as variações de volumes de poros. Neste caso, é correto dizer que os poros não tiveram grande influência na melhoria da combustibilidade. Isto pode ser verificado nas outras figuras 5.62 e 5.63. Importante salientar que na figura 5.63 tem-se a relação da superfície específica com o índice de combustão, neste caso como a granulometria é constante, o aumento da superfície específica está relacionado com o aumento da porosidade.



**Figura 5.61** – Relação entre volume total de poros e índice de combustão, variando a taxa de injeção.



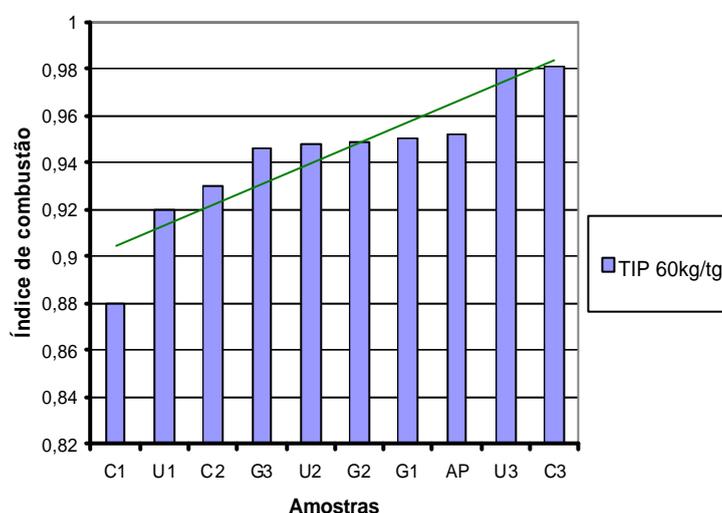
**Figura 5.62** – Relação entre volume de microporos e índice de combustão, variando a taxa de injeção.



**Figura 5.63** – Relação entre superfície específica e índice de combustão, variando a taxa de injeção.

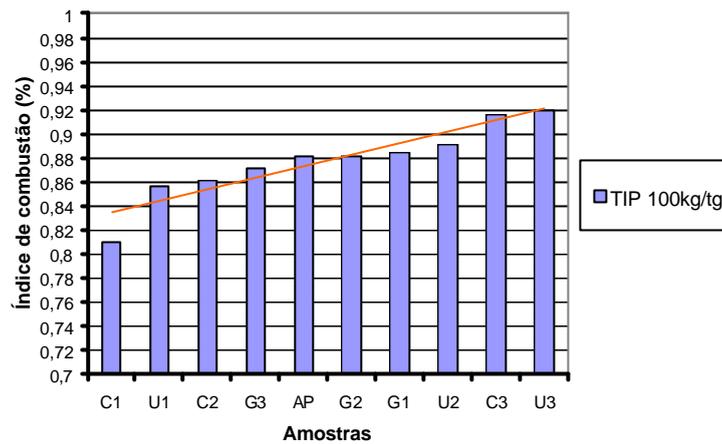
Fica claro, portanto, que o efeito marcante que influencia diretamente no índice de combustão está relacionado à questão química (ou seja relação O/C) e não a fatores físicos, demonstrando que a moagem do carvão vegetal não precisaria de ficar restrita a valores estreitos definidos pela prática industrial ( 80 % < 200 mesh).

As comparações das taxas de combustão para as amostras respectivas são mostradas nas figuras 5.64 a 5.66. Esse gráfico fornece o maior e menor índice de combustão por amostra. Para cada caso, manteve-se a taxa de injeção constante. Não se pode esquecer de analisar as propriedades químicas e físicas da amostras durante a escolha do carvão a ser usado, não ficando atrelado somente com o resultado do índice de combustão.



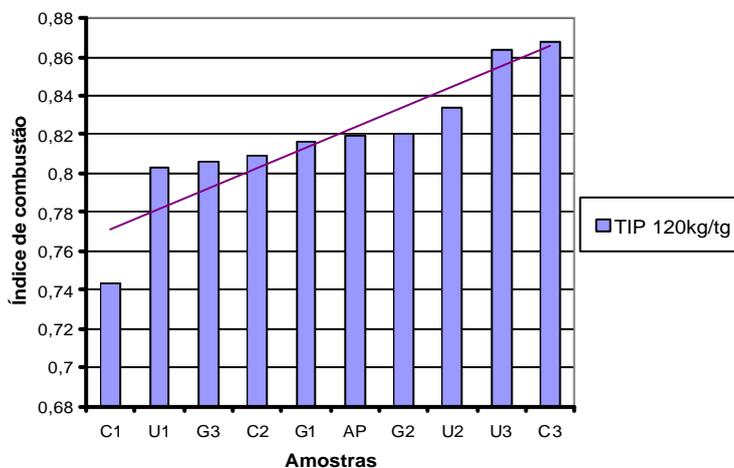
**Figura 5.64** – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 60kg/t gusa.

Analisando as três figuras 5.64 a 5.66, observa-se que a amostra de maior índice de combustão alternou entre a U3 e C3, com diferenças mínimas entre elas. Já a diferença delas para a próxima, em relação ao IC, é expressiva.



**Figura 5.65** – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 100kg/t gusa.

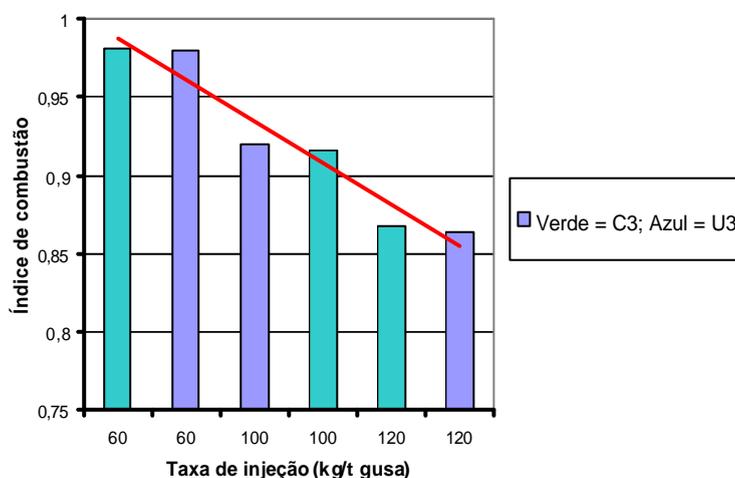
Analisando as amostras U3 e C3 na tabela V.27, observa-se que a diferença na análise química elementar está na umidade, carbono fixo e cinzas. A granulometria possui uma pequena diferença de  $2\mu\text{m}$ , o qual é praticamente descartado. Isto mostra que o carvão com umidade de 4,8% (amostra U3) apresenta o mesmo rendimento de um com 1,4% (amostra C3). No caso da cinzas, a diferença de 5,2% entre as amostras U3 e C3, não influencia na combustibilidade do carvão vegetal pulverizado. O carbono fixo possui uma diferença de 5,7% entre C3 e U3, mostrando neste caso, que a umidade foi um dos fatores a ajudar a melhorar a performance da combustibilidade do carvão U3. Sabendo que o carvão é higroscópico dir-se-ia que o carvão U3 seria o mais próximo da realidade das empresas.



**Figura 5.66** – Relação entre amostras e índice de combustão, com a taxa de injeção constante; TIP = 120kg/t gusa.

O carvão de pior rendimento foi o da amostra C1, como pode ser visto nas figuras 5.64 a 5.66. Este carvão apresentou o mais baixo teor de carbono fixo e mais alto teor de cinzas entre as amostras. Pelos resultados do TGA, ficou claro que quanto maior o teor de carbono fixo, menor índice de combustão, o que contraria os resultados obtidos no simulador de elevado gradiente térmico. Isto indica que o ensaio de TGA não poderia ser usado como simulador do índice de combustão, visto que as condições reinantes na zona de combustão são totalmente diferenciadas daquelas do equipamento de laboratório. Por outro lado, o simulador de elevado gradiente térmico, simula em condições geométricas, químicas e térmicas similares ao que ocorre no alto-forno, sendo portanto o equipamento ideal para simulações visando estudar o índice de combustão de carvão vegetal em altos-fornos.

Trabalhando somente os resultados das Amostras C3 e U3, obteve-se o gráfico representado na figura 5.67. A variação de perda de combustibilidade da passagem de 60kg/t gusa para 120kg/ t gusa foi entorno de 11,5%.



**Figura 5.67** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, para as amostras C3 e U3.

Assim, elevações da taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado podem induzir a redução no índice de combustão, limitando, portanto aspectos operacionais do alto-forno no tocante a permeabilidade. É fundamental que os limites da permeabilidade do alto-forno estejam bem definidos, para se verificar os limites da taxa de injeção que

poderiam ser praticadas seguramente sem afetar a passagem do gás no interior do alto-forno.

## 6. Conclusões

Da pesquisa realizada, pode-se concluir:

- O carvão vegetal de melhor índice de combustão são os C3 e U3, sendo o de pior performance o C1;
- o índice de combustão diminuiu com o aumento da taxa de injeção, em todas as amostras. Os valores oscilaram entre 11 e 24%, dependendo da qualidade química e física do carvão vegetal;
- A taxa de injeção de 120kg/ t gusa mostrou-se possível de ser usada para as amostras C3 e U3, quando se compara o IC mínimo da Calsete (89,6%), com o das amostras C3 e U3 de 87,1% e 86,8% respectivamente;
- O aumento da umidade 1 a 5% provocou aumento do índice de combustibilidade da ordem de 6%, tendo sido independente da elevação da taxa de 60 para 120 kg/t gusa.
- O aumento de 68 $\mu$ m para 162 $\mu$ m na granulometria do carvão vegetal analisado não provocou variações expressivas no índice de combustão.
- Existe possibilidade concreta de elevar a granulometria do carvão vegetal a ser injetado no alto-forno, sem afetar o índice de combustão;
- o índice de combustão não modificou sensivelmente com a variação de volume de microporos e poros. Esse mesmo efeito foi observado no caso da superfície específica do carvão vegetal pulverizado.
- o aumento de porosidade do carvão vegetal não favorece a combustibilidade.
- alterações no teor de carbono fixo de 11% implicaram em mudanças de até 12% no índice de combustão, mostrando a importância dessa propriedade para a combustibilidade do carvão vegetal pulverizado;
- foi observado que para maiores taxas de injeção, maior é o efeito do teor de carbono fixo no índice de combustão;
- o aumento da granulometria de carvão vegetal pulverizado mostrou um aumento na superfície específica, área dos microporos, dos volumes de poros e microporos;
- a análise de combustibilidade e reatividade do carvão vegetal utilizando TGA/DTG não mostraram coerência de comparações, em relação ao feito pelo simulador de combustão.

## **7. Recomendações**

- Analisar melhor a influência da umidade, carbono fixo e granulometria na combustibilidade. Analisando umidades, carbono fixo e granulometria maior, com o intuito de verificar os limites da granulometria sobre o índice de combustão.
- Estudar a combustibilidade levando em consideração análise elementar e da cinzas.
- Fazer correlação de procedência e carbonização de carvão vegetal com a combustibilidade.
- Verificar carvões com porosidade maiores para analisar o efeito deste na combustibilidade, principalmente nas variações de umidade.
- Promover ensaios de combustibilidade, alterando-se a temperatura de sopro e enriquecimento de oxigênio.
- Promover simulações de ICP com taxas de injeção superiores aos valores estudados.
- Estudar melhor a relação de reatividade e combustibilidade com a técnica TGA para carvão vegetal, levando em consideração análise imediata sem cinzas.

## 8. Revisão Bibliográfica

- 1 - Assis, P. S. et alli. *Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, 292p.
- 2 - Araujo, L. A.; *Manual de Siderurgia, Produção*. São Paulo: Ed. 1997. V. 1, 512p.
- 3 - Mourão, M. B. et alli. *Introdução a Siderurgia*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007, 428p.
- 4 - Patusco, J. A. M. et alli. *Balanço Energético Nacional (BEN)*, Ministério de Minas e Energia, 2006, 192p.
- 5 - Oliveira, J. B., Gomes, P. A., Almeida, M. R. *Carvão vegetal – Destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade*, In: Penedo, W.R. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - Publicação técnica, Belo Horizonte 1982, 173p.
- 6 - Braga, R. N. B. et alli. *Carvão Vegetal, Produção, Propriedades e Aplicações na Siderurgia*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992, 320p.
- 7 - Ferreira, O. C. *Emissão de Gases de Efeito Estufa na Produção e no Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia*. Revista Economia & Energia. Maio e junho de 2000, N° 20, 19p.
- 8 - Moraes, S. A. L., Nascimento, E. A., Melo, D. C. *Análise da Madeira de Pinus Carpa Parte 1 – Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis*. SIF, Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, v.29, n.3, 2005, p.461-470.
- 9 - Brito, J. O., Barrichelo, L. E. G. *Correlações entre Características Físicas e Químicas da Madeira e a Produção de Carvão Vegetal: I. Densidade e Teor de Lignina da Madeira de Eucalipto*. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. Circular técnica N° 14, 1977, p. 9-20.

10 - Brito, J. O. *Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico*. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais, Circular técnica N° 181, outubro de 1993, 6p.

11 - Juvillar, J. B. *O Carvoejamento da Madeira e seus Reflexos na Qualidade do Carvão: Qualidade da Madeira*. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. Circular técnica N° 64, setembro de 1979, 6p.

12 – Castro, L. F. A. *The Mini Blast Furnace – A Challenge for a New Ironmaking*. 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte-M.G. V. 1, p. 485 – 494.

13- The U.S. Department of Energy and Bethlehem Steel Corporation. A report on a project conducted jointly under a cooperative agreement between: *Blast Furnace Granular Coal Injection System Demonstration Project*. Topical Report, N° 15, novembro de 1999, 28p.

14 – Stainlay, R., Bennett, P. *PCI Coal – Status and Forecast*. 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte - M.G. V. 1, p.24-34.

15 – Castro, L. F. A., Tavares, R. P. *Efeitos da Injeção de Carvão Pulverizado nas Condições Operacionais do alto-forno*. 53° Congresso Tecnologia Metalúrgica e Materiais – congresso anual da ABM – 13 a 17 de setembro de 1998, Belo Horizonte-MG. V. 1, p. 2004 – 2016.

16 – Assis, P. S., Vieira, C. B., Sobrinho, P. J. N. *New developments for Powder Coal Injection into the blast furnaces*. Steel Research International, N°. 75, V. 4, April 2004, p. 235-239.

17 - Nogami, H., Yagi, J., Sampaio, R. S. *Exergy Analysis of Charcoal Charging Operation of Blast Furnace*. Revista ISIJ International, 2004, V. 44, N° 10, p. 1646 – 1652.

18 – Assis, P. S. *Einblasen von Holzkohle in den Holzkohlehochofen*. Dr. Dissertation bei der RWTH-Aachen, 1991, 124 S.

19 - Silva, A. M. *Estudo da Combustão de Carvões e Misturas com o Coque Verde de Petróleo injetados em altos-fornos*. Tese de mestrado. UNESP, 2006, 97p.

20 - Castro, J. A., Gonçalves, J. M., Baltazar, A. W. de S., Silva, A. J., Vilela, A. C. F., Osório, E. *Estudo do Comportamento do alto-forno operando com injeção auxiliares de carvões mineral e vegetal pulverizados*. Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-MG. V. 1, p. 223 - 231.

21 – Silva, A. M., Cabral, A. O. C., Medrado, S. B., Noblat, S. J. X., Junior, J. A. de C. *Avaliação de Desempenho dos Carvões e Misturas Injetadas nos Altos-fornos da CSN através do Método de Determinação da Combustibilidade e da Reatividade Medida em Termobalança*. XXXV Seminário e Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 de agosto a 2 de setembro de 2005, Florianópolis-SC. V. 1, p. 400 - 413.

22 – Maki, A., Sakai, A., Takagaki, N., Mori, K., Arityama, T., Sato M., Murai, R. *High Rate Coal Injection of 218 kg/t at Fukuyama N°4 Blast Furnace*. Revista ISIJ International, V. 36, N° 6, 1996, p. 650 – 657.

23 - Ichida, M., Orimoto, T., Tanaka, T., Koizumi, F. *Behavior of Pulverized Coal Ash and Physical Property of Dripping Slag under High Pulverized Coal Injection Operation*. Revista ISIJ International, V. 41, N° 4, 2001, p. 325 – 332.

24 - Kawakami, M., Karato, T., Takenaka, T., Yokoyama, S. *Structure Analysis of Coke, Wood Charcoal and Bamboo Charcoal by Raman Spectroscopy and their Reaction Rate with CO<sub>2</sub>*. Revista ISIJ International, V. 45, N° 7, 2005, p. 1027 – 1034.

25 – Kawakami, M., Taga, H., Takenaka, T. and Yokoyama, S.. *Micro Pore Structure and Reaction Rate of Coke, Wood Charcoal and Graphite with CO<sub>2</sub>*. Revista ISIJ International, V. 44, N° 12, 2004, p. 2018 – 2022.

- 26 – Assis, P. S., Martins, W. de B., Sobrinho, P. J. N. *Injeção de Carvão Pulverizado*. Revista Metalurgia & Materiais. V. 58, N°. 527, 2002, p. 754 – 755.
- 27 – Kunitomo, K., Ichida, M., Naito, M. *High-Production Blast Furnace Operation with High-Rate Pulverized Coal Injection and Analysis of Samples Taken from It*. 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte-M.G. V. 1, p. 485 – 494.
- 28 – Neto, F. B., Neto, J B. F., Takano, C., Mourão, M. B. *Avaliação da Reatividade de Produtos Carbonosos*. 61 Congresso Anual da ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro-RJ, V. 1, p. 9 - 16.
- 29 – Costa, V. J., Krioukov, V., Maliska, C. R. *Combustão de Partículas de Carvão Pulverizado Contendo Umidade em seu Interior*. Endereço eletrônico: [http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/artigos/costa\\_maliska\\_ENCIT2000.pdf](http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/artigos/costa_maliska_ENCIT2000.pdf) . Acesso em 20/10/07.
- 30 - Stainlay, R. *PCI – Current Status and Prospects for Growth*. Paper presented at Asia Steel International Conference, Jamshedpur, India, abril 2003, 38p.
- 31 - Assis, P. S., Martins, W. B., Vieira, C. B. *Avanços na Injeção de Carvão Pulverizado para a sua Aplicação em Altos-Fornos*. REM, Revista Escola de Minas, v. 56, n. 4, Ouro Preto Oct./Dec. 2003, 9p.
- 32 - Castro, J. A., Silva, A. J., Nogami, H., Yagi, J. *Simulação Computacional da Injeção de Carvão Pulverizado nas Ventaneiras de Mini Altos-Fornos*. Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais. v. 1, n. 2, São Paulo, out. – dez. 2004, p. 59-62.
- 33 – Carneiro, R. T. S., Giudice, F. D. P., Castro, J. B. *Metodologia de Seleção de Carvões para Injeção em Altos-fornos*. 2° Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, ABM. São Paulo 1997, 15p.
- 34 – Defendi, G. A. *Caracterização da Cinética de Reação e Comportamento das Cinzas dos Carvões Minerais Injetados através das Ventaneiras dos Altos-Fornos da CST*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Abril de 2006, 78p.

- 35 – Baltazar, A. W. S. *Modelamento Matemático e Simulação de um Ensaio de Combustão de Carvão Pulverizado*. Dissertação de Mestrado, UFF, 2004, 125p.
- 36 – Castro, A. C., Gonçalves, J. M., Baltazar, A. W. S., Silva, A. J., Vilela, A. C. F., Osório, E. *Estudo do Comportamento do Alto-Forno Operando com Injeções Auxiliares de Carvões Mineral e Vegetal Pulverizados*. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas. VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, M.G. Anais, v. 1, 2006, p. 223-231.
- 37 – Silva, M. C., Júnior, R. C., Defendi, G. A., Alves, M. T., Silva, F. D. *Filosofia da Aquisição e Utilização de Carvões Para PCI na CST Arcelor Brasil*. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-M.G. Anais, V. 1, p. 269 - 277.
- 38 – Barroso, R. C., Peres, A. E. C., Montenegro, L. C. M., Galery, R. *Caracterização Tecnológica dos Finos de Carvão Vegetal*. XXXV Seminário e Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 de agosto a 2 de setembro de 2005, Florianópolis-SC. Anais V. 1, p. 284 - 293.
- 39 – Baltazar, A. W. S., Castro, J. A., Silva, A. J. *Modelagem e Simulação Computacional da Injeção de Carvão Pulverizado no Canal Adutor da “Raceway” de Altos-Fornos*. Revista Estudos Tecnológicos de julho a dezembro de 2006, V. 2, N° 2, p. 65-77.
- 40 – Gomes, M. de L. I., Osório, E., Vilela, A. C. F. *Thermal Analysis Evaluation of the Reactivity of Coal Mixtures for Injection in the Blast Furnace*. Revista Materials Research, V. 9, N°1, 2006, p. 91-95.
- 41 – Castro, J. A., Baltazar, A. W. de S., Silva, A. J. *Estudo da Operação do Alto-forno com Injeção Simultânea de Gás Natural e Carvão Pulverizado Utilizando o Modelo Total do Alto-forno*. XXXV Seminário e Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 de agosto a 2 de setembro de 2005, Florianópolis-SC. V. 1, p. 33 - 43.

42 - Yamagata, C., Kajiwara, Y., Suyama, S., Sato, K., Komatsu, S. *Simultaneous Injection of Pulverized Coal and Dolomite into Blast Furnace Tuyeres*. Revista ISIJ International, V. 30, N° 5, 1990, p. 362 – 371.

43 - Filho, G. de A., Assis, P. S. *Aspectos técnicos da injeção de pó de pneu em altos-fornos*. 61 Congresso Anual da ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro-RJ, p. 3135 – 3141.

44 – Asanuma, M., Ariyama, T., Sato, M., Murai, R., Nonaka, T., Okochi, I., Tsukiji, H., Nemoto, K. *Development of Waste Plastics Injection Process in Blast Furnace*. Revista ISIJ International, V. 40, N° 3, 2000, p. 244 – 251.

45 - Yamaguchi, K., Ueno, R., Naito, M., Tamura, K. *Maximum Injection Rate of Fine Ore into Blast Furnace through Tuyeres*. ISIJ International, V. 31, N° 7, 1991, p. 677 – 684.

46 – Gorni, A. A. *Aproveitamento de Plástico Pós-Consumo na Forma de Combustível para Altos-Fornos e Coquerias*. Revista Plástico Industrial, Janeiro 2006, p. 84-100.

47 – Silva, A. M., Cabral, C. A. O., Medrado, S. B., Noblat, S. J. X., Junior, J. A. C. *Avaliação do Desempenho dos Carvões e Misturas Injetadas nos AF'S da CSN através do Método de Determinação da Combustibilidade e da Reatividade Medida em Termobalança*. XXXV Seminário e Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 de agosto a 2 de setembro de 2005, Florianópolis-SC. V. 1, p. 400 - 413.

48 – Pereira, E. M. L., D'Abreu, J. C., Villela, T. F. *Possibilidade de Injeção de Pó de Coletor pelas Ventaneiras do Alto-forno*. Revista Materials Research, V. 47, N°. 399, 1991, p. 450-454.

49 – Cavaliere, C. K. N., Jannuzzi, G. M. *A Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno como Medida de Redução das Emissões de CO<sub>2</sub> do Segmento Siderúrgico Nacional: Estudo de Casos na Acesita e Cosipa*. XXI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Dia 16 a 18 de junho de 1999, Vitória-ES, 11p.

50 – Oliveira, G. M., Candido, L. S., Assis, P. S. *Avaliação de Vídeo Fotográfica do Fluxo de Materiais Pulverizados em um Simulador de Injeção pelas Ventaneiras de Altos-Fornos*. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-M.G. Anais, V. 1, p. 64-75.

51 – Sobrinho, P. J. N., Junior, O. T. P., Bandyopadhyay, D., Assis, P. S. *Installation of a Bench-Scale Equipment for Simulation of the Injection of Materials into Blast Furnace*. REM, Revista Escola de Minas, V. 52, N° 4, Ouro Preto Oct./Dec. 1999, p. 285 - 289.

52 - Gupta, S., Al-Omari, Y., Sahajwalla, V., French, D. *Influence of Carbon Structure and Mineral Association of Coal on Their Combustion Characteristics for PCI*. Revista Metallurgical and Materials Transactions B, V. 37, N° 3, June 2006, p. 457-473.

53 - Weiser, R., Braune, I., Matthes, P. *Control Blast Furnace Pulverized Coal Injection to Increase PCI Rates*. Endereço eletrônico: Acesso em 16/11/07.  
[http://library.aist.org/ISSStore/PDF.nsf/OnePage\\_by\\_Name/PR-349-033/\\$FILE/PR-349-033.pdf?OpenElement](http://library.aist.org/ISSStore/PDF.nsf/OnePage_by_Name/PR-349-033/$FILE/PR-349-033.pdf?OpenElement).

54 – Faria, L. M., Brito, J. O. *Carvão Vegetal Pulverizado como Opção Energética*. Circular Técnica IPEF: Filosofia De Trabalho De Uma Elite De Empresas Florestais Brasileiras. N° 138, Outubro de 1981, 6p.

55 – Brito, J. O. *Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira*. Documentos Florestais do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Maio de 1990, Piracicaba-SP. p. 1-19.

56 – Yamaguchi, K. Ueno, R., Tamura, K. *Maximum Injection Rate of Pulverized through Tuyeres with Consideration of Coal into Blast Furnace Unburnt Char*. ISIJ International, V. 32, N° 6, 1992, p. 716 – 724.

57 – Pinheiro, P. C. C., Sèye, O. *Influência da Temperatura de Carbonização nas Propriedades do Carvão Vegetal de Eucalyptus*. 53° Congresso Tecnologia Metalúrgica e Materiais, ABM. 13 a 17 de setembro de 1998, Belo Horizonte–MG. V. 2, p. 2032-2042.

58 - Andahazy, D., Slaby, S., Löffler, G., Winter, F., Feilmayr, C., Bürgler, T. *Governing Processes of Gas and Oil Injection into the Blast Furnace*. Revista ISIJ International, V. 46, N° 4, 2006, p. 496 – 502.

59 – Ghiggi, M. L. F., Osório, E., Vilela, A. C. F. *Estudo de Reatividade de Misturas de Carvão do Faxinal e Coque de Petróleo para uso em PCI*. . Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-MG. V. 1, p. 213 - 222.

60 - Quintão, M. A., Torres, A. A. *Controle de processo de dto-forno*. Apostila de Plano de Desenvolvimento Operacional, ACESITA. 1989, p.125.