

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

UTILIZAÇÃO DE CAREPAS COMO COMPONENTE DA CARGA DE UM FORNO  
ELÉTRICO A ARCO

**Anderson Badia da Silva**

Dissertação para obtenção do título de  
*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia*

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGE3M

UTILIZAÇÃO DE CAREPAS COMO COMPONENTE DA CARGA DE UM FORNO  
ELÉTRICO A ARCO

Anderson Badia da Silva  
Engenheiro Metalúrgico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Prof. Dr. Eduardo Osório

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, 12 de novembro de 2012.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Severina e Nicolau, que deixaram a dedicação e a perseverança como lastro para minha vida. Também à minha esposa Eidi e minha filha Larissa pela compreensão e apoio que me ampararam ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

A satisfação por concluir esta etapa da minha formação é sem igual, comparada a conquista de um tesouro indelével, o qual tenho prazer em dividir com as pessoas que me cercam e que me ajudaram ao longo desta jornada.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, o qual é fonte inesgotável de conhecimento, sabedoria e inspiração para tudo na vida.

Ao Professor Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela, pessoa que tem guiado meus passos acadêmicos desde a época de graduação até os dias de hoje, pelo estímulo constante e seriedade nas orientações.

À Gerdau Riograndense, pela oportunidade de crescimento e pelo investimento na minha capacitação técnica. Ao engenheiro metalúrgico e gestor Tiago Alliatti Beleza por proporcionar e me apoiar na execução deste projeto na Aciaria da Gerdau Riograndense.

Aos demais colegas e engenheiros da Aciaria da Gerdau Riograndense pelas discussões, apoio e troca de experiências ao longo desta jornada.

Aos amigos do LASID pelas novas oportunidades de convívio que este projeto proporcionou, em especial aos colegas Engenheiros Bruno e Marcelo por dedicarem tempo no laboratório e na usina para este projeto.

À minha família pela compreensão na ausência e reclusão que agora serão recompensadas com avidez.

Muito obrigado a todos.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>08</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
2.1. <i>Objetivo geral.....</i>	19
2.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	19
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
3.1. <i>A produção de aço.....</i>	20
3.2. <i>A produção de aço em usinas integradas a alto-forno a coque.....</i>	21
3.3. <i>A produção de aço em usinas mini mills semi-integradas.....</i>	23
3.3.1. <i>Forno elétrico a arco (FEA) – Fusão e refino primário.....</i>	24
3.3.2. <i>Forno-panela (FP) – Refino secundário do aço.....</i>	30
3.3.3. <i>Lingotamento contínuo (LC) – Solidificação do aço.....</i>	31
3.4. <i>Laminação de aços longos.....</i>	33
3.5. <i>Resíduos siderúrgicos.....</i>	35
3.5.1. <i>Agregado siderúrgico.....</i>	37
3.5.1.1. <i>Escórias de alto-forno a coque.....</i>	38
3.5.1.2. <i>Escórias de aciaria elétrica.....</i>	39
3.5.2. <i>A carepa.....</i>	44
3.5.3. <i>Pó de aciaria elétrica.....</i>	51
3.6. <i>A reciclagem de resíduos em usinas integradas de altos-fornos a coque.....</i>	52
3.7. <i>Processos alternativos de reciclagem – Autorredução.....</i>	53
3.8. <i>A reciclagem de resíduos em usinas mini mills semi-integradas.....</i>	58
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
4.1. <i>Coleta e preparação das amostras.....</i>	62

4.2. Caracterização física e química das carepas.....	65
4.2.1. Determinação de umidade e óleo.....	65
4.2.2. Análise granulométrica.....	66
4.2.3. Análise química do ferro por via úmida.....	67
4.2.4. Análise de difração de raios-X (DRX).....	67
4.2.5. Análise por espectroscopia Mössbauer (EM).....	67
4.3. Testes de redução em forno mufla.....	68
4.3.1. Elaboração da mistura.....	69
4.3.2. Ensaio de autorredução em forno mufla.....	71
4.3.3. Ensaio de redução-fusão em forno mufla.....	73
4.4. Testes de aplicação da carepa no forno elétrico a arco.....	74
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>80</b>
5.1. Caracterização física e química das carepas.....	80
5.1.1. Análise granulométrica.....	80
5.1.2. Determinação de umidade e óleo.....	83
5.1.3. Análise química do ferro por via úmida.....	84
5.1.4. Análise de difração de raios-X (DRX).....	84
5.1.5. Análise por espectroscopia Mössbauer (EM).....	85
5.2. Ensaio de laboratório em forno mufla.....	87
5.2.1. Ensaio de autorredução.....	87
5.2.1.1. Mini bags com constituintes estratificados.....	87
5.2.1.2. Mini bags com constituintes misturados.....	89
5.2.2. Ensaio de redução-fusão.....	91
5.2.2.1. Análise da fração reagida.....	91
5.2.2.2. Avaliação do grau de metalização.....	93
5.3. Resultados da aplicação da carepa no FEA.....	97
5.3.1. Fatores operacionais de monitoramento.....	97
5.3.2. Fatores operacionais de resposta.....	100
5.3.2.1. Composição do FeO na escória.....	100
5.3.2.2. Avaliação do rendimento metálico.....	102
5.3.2.3. Consumo de energia elétrica.....	106

5.3.2.4. Avaliação do teor de fósforo no aço.....	108
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>113</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>114</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>120</b>
9.1. Análise de variância (ANOVA) dos indicadores dos testes no FEA.....	120
9.2. Difractogramas complementares das carepas.....	123

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Produção de aço pelas rotas produtivas integradas e semi-integradas.....	21
<b>Figura 2</b>	Detalhe esquemático do alto-forno visto em corte e foto do alto-forno industrial.....	22
<b>Figura 3</b>	Forno elétrico a arco visto em corte e operações associadas ao processo.....	24
<b>Figura 4</b>	Ciclo da geração de sucata de aço e suas rotas de reciclagem.....	27
<b>Figura 5</b>	Pilhas de sucata para consumo em forno elétrico a arco.....	29
<b>Figura 6</b>	Forno-panela visto em corte e operações associadas.....	30
<b>Figura 7</b>	Solidificação de aço líquido no processo de lingotamento contínuo....	31
<b>Figura 8</b>	Formação da carepa ao longo do tarugo no resfriamento no LC.....	32
<b>Figura 9</b>	Poço de acumulação e coleta de carepa do LC.....	32
<b>Figura 10</b>	Desenho esquemático do processo de laminação e uma gaiola de laminação.....	33
<b>Figura 11</b>	Vista panorâmica de um trem de laminação e suas respectivas gaiolas.....	34
<b>Figura 12</b>	Geração de escórias oxidantes e redutoras em uma aciaria elétrica e volumes médios obtidos.....	40
<b>Figura 13</b>	Pilha de agregado siderúrgico estocado aguardando período de estabilização.....	42
<b>Figura 14</b>	Carepa de lingotamento contínuo e seu detalhe à direita.....	45
<b>Figura 15</b>	Carepa estocada sob galpão impermeabilizado.....	45
<b>Figura 16</b>	Evolução dos óxidos na formação da carepa em função do tempo.....	47
<b>Figura 17</b>	Diagrama de Chaudron (ferro - oxigênio - carbono).....	48
<b>Figura 18</b>	Curva de Boudouard.....	54
<b>Figura 19</b>	Representação esquemática de um aglomerado autorredutor.....	55
<b>Figura 20</b>	Etapas envolvidas na redução de um aglomerado autorredutor.....	56
<b>Figura 21</b>	Forno TecnoRed em detalhes esquemáticos.....	58
<b>Figura 22</b>	Geração média de carepa, destacando setores de interesse para caracterização denominados laminação 1 e 2.....	61

<b>Figura 23</b>	Recolhimento da carepa do poço de acumulação.....	63
<b>Figura 24</b>	Aspecto morfológico da carepa de plaquetas grosseiras e a parte mais fina.....	64
<b>Figura 25</b>	Ilustração do procedimento de coleta de amostras de carepas.....	64
<b>Figura 26</b>	Peneiramento contínuo para beneficiamento da carepa.....	65
<b>Figura 27</b>	Distribuição granulométrica, análise imediata e aspecto morfológico do Unicarbo20.....	69
<b>Figura 28</b>	Disposição das partículas de carepa (claras) e do material redutor (escuras) nos “mini bags” testados. Amostra estratificada (esquerda), misturada (centro) e “mini bag” pronto para ensaio.....	70
<b>Figura 29</b>	Forno Mufla (esquerda) com detalhes esquemáticos (direita).....	71
<b>Figura 30</b>	Procedimento de ensaio em forno mufla, (a) abertura do forno e carregamento das amostras, (b) fechamento da tampa do forno, (c) retirada das amostras do forno e (d) resfriamento em nitrogênio líquido.....	72
<b>Figura 31</b>	Ciclo térmico do forno com os tempos de retirada da amostra.....	73
<b>Figura 32</b>	Manuseio da carepa com eletroímã no pátio de preparação de cestões.....	74
<b>Figura 33</b>	Estratificação esquemática de um cestão, com carepa adicionada entre camadas de ferro gusa.....	76
<b>Figura 34</b>	Amostra de aço tipo “ <i>sample on line</i> ” ou “pirulito” (esquerda) e de escória (direita) retiradas ao final de cada corrida para análise de composição química.....	77
<b>Figura 35</b>	Comparação da morfologia das carepas grossas da laminação 1 e 2 (LG) e carepas finas da laminação 1 e 2 (LF).....	80
<b>Figura 36</b>	Distribuição granulométrica das carepas grossas das laminações.....	81
<b>Figura 37</b>	Distribuição granulométrica das carepas finas das laminações.....	81
<b>Figura 38</b>	Distribuição granulométrica das carepas misturadas.....	82
<b>Figura 39</b>	Difratograma característico das carepas LG1 (laminação grossa 1)....	85
<b>Figura 40</b>	Espectro característico obtido por análise de EM.....	86
<b>Figura 41</b>	Fração reagida para os ensaios de autorredução com carepa e	

	coque dispostos de forma estratificada no “mini bag”.....	87
<b>Figura 42</b>	Grau de metalização para os ensaios de autorredução com carepa e coque dispostos de forma estratificada no “mini bag”.....	88
<b>Figura 43</b>	Fração reagida para os ensaios de autorredução com carepa e coque misturados no “mini bag”.....	89
<b>Figura 44</b>	Grau de metalização para os ensaios de autorredução com carepa e coque misturados no “mini bag”.....	90
<b>Figura 45</b>	Fração reagida para os ensaios de redução-fusão em forno mufla a 1500°C.....	92
<b>Figura 46</b>	Morfologia das amostras em ensaio de redução-fusão após, a) 2, b) 4, c) 6, d) 8, e) 10, f) 12, g) 16 minutos.....	95
<b>Figura 47</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo do consumo de oxigênio nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	98
<b>Figura 48</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo do consumo de coque nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	99
<b>Figura 49</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo do teor de FeO nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	101
<b>Figura 50</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo do rendimento metálico nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	103
<b>Figura 51</b>	Relação entre rendimento real e teórico obtido para os ensaios com carepa, na condição de 20% de ferro-gusa na carga.....	105
<b>Figura 52</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo do consumo de energia elétrica nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	106
<b>Figura 53</b>	“Boxplots” paralelos do comparativo da composição de fósforo nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.....	108

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b>	Produção brasileira de aço bruto por processo de aciaria.....	21
<b>Tabela 2</b>	Geração, compras e consumo de sucata no mercado brasileiro.....	29
<b>Tabela 3</b>	Resíduos gerados na indústria siderúrgica mundial e brasileira.....	35
<b>Tabela 4</b>	Variação de composição química de escórias oxidantes e redutoras..	40
<b>Tabela 5</b>	Especificação das peneiras utilizadas no ensaio granulométrico das carepas.....	66
<b>Tabela 6</b>	Composições da carepa, redutor e da mistura autorredutora.....	70
<b>Tabela 7</b>	Proporção volumétrica entre carepas de morfologia fina e grossa.....	80
<b>Tabela 8</b>	Resultados dos ensaios de quantificação de umidade e óleo.....	83
<b>Tabela 9</b>	Resultados de análise química via úmida para as amostras estudadas.....	84
<b>Tabela 10</b>	Resultado quantitativo obtido através da espectroscopia Mössbauer e a relação atômica O/Fe das carepas.....	86
<b>Tabela 11</b>	Análise das amostras por via úmida antes/após ensaios de redução-fusão.....	93

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b>	Reação de combustão parcial.....	25
<b>Equação 2</b>	Reação de combustão completa.....	25
<b>Equação 3</b>	Reação de pós-combustão.....	25
<b>Equação 4</b>	Reação de oxidação do ferro.....	25
<b>Equação 5</b>	Reação de oxidação do manganês.....	25
<b>Equação 6</b>	Reação de oxidação do silício.....	25
<b>Equação 7</b>	Reação de oxidação do fósforo.....	25
<b>Equação 8</b>	Reação de oxidação do cromo.....	25
<b>Equação 9</b>	Reação de oxidação do gás natural.....	25
<b>Equação 10</b>	Reação de redução do ferro.....	25
<b>Equação 11</b>	Reação de redução do enxofre.....	25
<b>Equação 12</b>	Reação de redução do ferro à sua forma metálica.....	49
<b>Equação 13</b>	Reação de redução da hematita à magnetita.....	49
<b>Equação 14</b>	Reação de redução da magnetita à wustita.....	49
<b>Equação 15</b>	Reação de redução da wustita a ferro metálico.....	49
<b>Equação 16</b>	Reação genérica de redução carbotérmica do óxido de ferro.....	55
<b>Equação 17</b>	Formação de CO pela reação de Boudouard.....	55
<b>Equação 18</b>	Reação global de redução de óxido de ferro por CO.....	55
<b>Equação 19</b>	Determinação da fração reagida para testes de redução.....	68
<b>Equação 20</b>	Relação teórica para rendimento obtida por regressão linear múltipla.....	104

**LISTA DE ABREVIações**

<b>LD</b>	Conversor Linz-Donawitz
<b>BOF</b>	Conversor Basic Oxygen Furnace
<b>AF</b>	Alto-forno
<b>FEA</b>	Forno Elétrico a Arco
<b>EOF</b>	Energy Optimizing Furnace
<b>RD</b>	Redução Direta
<b>RF</b>	Redução Fusão
<b>IABR</b>	Instituto Brasileiro de Siderurgia
<b>FP</b>	Forno-panela
<b>LC</b>	Lingotamento Contínuo
<b>L1</b>	Laminador 1
<b>L2</b>	Laminador 2
<b>CM</b>	Carepa Misturada
<b>LASID</b>	Laboratório de Siderurgia
<b>UFRGS</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>EM</b>	Espectroscopia Mössbauer
<b>DRX</b>	Difração de Raios X
<b>LEAMET</b>	Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia
<b>CA</b>	Concreto Armado
<b>PPC</b>	Pátio de Preparação de Cestões
<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>KWh/t</b>	Quilowatt hora por tonelada
<b>C</b>	Carbono
<b>CH<sub>4</sub></b>	Gás Natural
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido Crômico
<b>Fe</b>	Ferro

<b>Fe<sup>0</sup></b>	Ferro Metálico
<b>FeO</b>	Óxido de Ferro Wustita
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Água
<b>O</b>	Oxigênio
<b>Mn</b>	Manganês
<b>MnO</b>	Óxido de Manganês
<b>PAE</b>	Pó de Aciaria Elétrica
<b>P</b>	Fósforo
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Pentóxido de Fósforo
<b>S</b>	Enxofre
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Sílica ou Dióxido de Silício
<b>MVA</b>	Megavolt-ampere

## RESUMO

As atividades industriais geram uma série de resíduos, muitos dos quais passíveis de reciclagem. Na indústria siderúrgica, em operações de lingotamento e conformação mecânica, forma-se uma casca sólida quebradiça, conhecida como carepa, a qual é originada a partir da oxidação da superfície do aço quando submetido ao gradiente térmico. Constituída por óxidos de ferro, portanto, carrega o elemento essencial para fabricação do aço.

Esse trabalho se utilizou de análises, ensaios laboratoriais e testes industriais para direcionar a reciclagem da carepa de uma usina siderúrgica no próprio forno elétrico a arco. Foram analisadas as propriedades físicas e químicas do material, e nos ensaios de redutibilidade em laboratório o comportamento da carepa foi observado frente à mistura com um agente redutor. Em escala industrial a carepa foi introduzida no forno elétrico a arco juntamente com a sucata de carregamento, e o comportamento das principais variáveis do processo foram avaliadas. Pelo entendimento da sua influência sobre o processo foi possível determinar a viabilidade de promover a reciclagem do resíduo no próprio processo siderúrgico.

As carepas geradas na planta siderúrgica se distinguiram, essencialmente, quanto ao tamanho de partícula e teor de umidade. Quimicamente, as amostras são semelhantes, com teor de ferro mínimo de 70%. Na sua composição, predominaram óxidos de hematita, magnetita e wustita, sendo este último o de maior importância. Nos ensaios de autorredução em laboratório, foram constatados melhores resultados para fração reagida e grau de metalização quanto mais alta a temperatura de ensaio. Nos testes em escala industrial, a adição de 1% de carepa na carga comprovou que não houve influência sobre o consumo de energia elétrica e o teor de FeO da escória. A desfosforação do aço líquido foi positivamente afetada com percentual médio de fósforo reduzido em 15% com utilização de carepa. Por outro lado, o indicador de rendimento metálico sofreu impacto negativo, evidenciando a necessidade de avaliações complementares para determinar a reciclagem deste resíduo no forno elétrico a arco.

### **Palavras-chave:**

Reciclagem, carepa, óxidos, forno elétrico a arco.

## **ABSTRACT**

Industrial processes generate several residues and many of them are suitable for recycling. In the steel industry, casting operations and mechanical forming originate a solid brittle layer of oxide known as scale, which is produced by oxidation of the steel surface when exposed to a thermal gradient. Consisting of iron oxides, it therefore holds the essential element for steel manufacturing.

This study performed analysis, laboratory trials and industrial tests to investigate scale recycling in an electric arc furnace. Chemical and physical properties of the material were analyzed and, at reducibility laboratory trials, the behavior of the scale was observed when mixed with a reducing agent. In industrial tests, the scale was introduced in an electric arc furnace mixed with the loaded scrap and the behavior of the main process variables was evaluated. By understanding its influence on the process, it was possible to determine the feasibility of scale recycling in steelmaking.

The scales generated in the steel plant were distinguished mainly by the particle size and moisture content. Samples were chemically similar, with minimum 70% iron content. In its composition predominate hematite, magnetite and wustite oxides, the latter being the most important. In self-reduction laboratory tests, the best results for fraction reacted and metallization grade were reached with the highest temperatures. In industrial tests, with 1% scale added to the scrap, there was no influence in the electric energy consumption or FeO content of the slag. The liquid steel dephosphorization was positively affected since the average phosphorus percentage was reduced by 15% with the scale utilization. However, the yield indicator suffered negative impact, suggesting the need for further assessments to determine the scale recycling feasibility in electric arc furnace process.

**Key words:**

Recycling, scale, oxides, electric arc furnace.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de aplicar-se diretrizes ambientais no contexto produtivo de qualquer empresa é hoje uma realidade no cenário competitivo globalizado. Além disso, devido à crescente preocupação com as questões ambientais, sobretudo o conceito de “rejeito zero” (OLIVEIRA, 2004), várias indústrias passaram a investir em novas alternativas para solucionar os problemas decorrentes da sua geração e disposição. Por outro lado, a evolução de receitas através da reciclagem desses materiais, contribui para sedimentação de uma nova política sobre a gestão dos aspectos ambientais, onde o beneficiamento e a comercialização de resíduos promovem a ideologia sobre o gerenciamento consciente desses materiais, agregando-lhes valor e destaque como co-produtos.

Nos processos de transformação das atividades industriais não é possível transformar a totalidade da matéria-prima em produto final, e na indústria siderúrgica não é diferente. Ali geram-se uma grande variedade de resíduos, dos quais muitos são passíveis de reciclagem, oferecendo, portanto, um vasto campo para desenvolvimento de estudos (TARCIZO, 2008). Dependendo da forma como são geridos, podem implicar em soluções caras e difíceis, que culminam, muitas vezes, em elevação no custo do produto final. Por este motivo, o reaproveitamento e a reciclagem dos subprodutos ou resíduos de processo diminuem os desperdícios, agregam maior eficiência e produtividade, além de menores investimentos e esforços em soluções ambientalmente adequadas.

A carepa é um resíduo oriundo da oxidação da superfície do aço, quando submetido ao gradiente térmico, ao meio corrosivo ou à simples ação do tempo. Nas indústrias siderúrgicas, a carepa provém, basicamente, das operações de lingotamento e das etapas de conformação mecânica, cuja geração média é significativa (TAKANO, 2000). É constituída basicamente por óxidos de ferro, principalmente por wustita (FeO), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), e portanto, carrega o ferro, o elemento fundamental para fabricação do aço.

O presente trabalho objetiva levantar evidências, através de análises laboratoriais, que possam direcionar aplicação industrial da carepa em um forno elétrico

a arco. Baterias de testes e análises foram conduzidas para caracterizar as propriedades das carepas e assim adequar os parâmetros ambientais, processuais e econômicos às necessidades da usina geradora. Para isso, a recuperação do teor metálico contido na carepa passa a ser um forte atrativo também do ponto de vista econômico, pois pode substituir, em parte, matérias-primas usualmente empregadas no processo de fabricação do aço.

Por outro lado, fatores termodinâmicos e até mesmo cinéticos poderão dificultar o processamento da carepa no forno, uma vez que uma série de parâmetros poderão ser afetados (MOURÃO, 2007). Sendo assim, o balanço entre os fatores positivos e negativos sobre o processo de fusão é a condição fundamental para determinar a implantação deste estudo em escala industrial.

Desta forma, o desenvolvimento de processos de reciclagem da carepa em forno elétrico a arco deve buscar a otimização para cada reator, despontando como um desafio a ser superado. As grandes motivações para atingir este objetivo, sem dúvida, passam por assegurar um gerenciamento ambiental eficiente, garantindo o atendimento da legislação vigente, causando o mínimo de perturbação no processamento do aço e, se possível, ainda aumentar a produtividade e a lucratividade das empresas siderúrgicas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho irá estudar o potencial de reciclagem das carepas geradas no processamento siderúrgico de uma usina do Rio Grande do Sul com vistas à reintrodução deste material no forno elétrico a arco, como um componente adicional à carga metálica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar através de análises laboratoriais as propriedades físicas e químicas de uma amostra representativa de carepas de uma usina siderúrgica;

Avaliar o comportamento de amostras representativas de carepas frente à mistura com um agente redutor em ensaios de redutibilidade, conduzidos em laboratório, sob a variação de tempo e temperatura;

Avaliar o comportamento das principais variáveis de controle do processo de um forno elétrico a arco, a partir da introdução de 1% de carepa “*in natura*” como parte de sua carga sólida. Os testes serão conduzidos em campanhas utilizando-se 20 e 25% de ferro-gusa na carga do FEA.

Determinar a viabilidade de tornar a carepa “*in natura*” uma fonte alternativa de matéria-prima para um forno elétrico a arco, promovendo a reciclagem deste resíduo no próprio processo siderúrgico.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A PRODUÇÃO DE AÇO

A primeira vez que o homem viu o ferro foi sob a forma de meteoritos, eis neste evento a origem da palavra siderurgia, pois “*SIDUS*” significa estrela no latim. As primeiras evidências de seu uso ocorreram na China e Índia por volta de 2.000 (aC). Já o início da transformação, ou da obtenção de um material ferroso de utilidade para o homem, foi evidenciado com os Hititas em 1.700 (aC), os quais aqueciam uma mistura de minério de ferro e carvão vegetal em um buraco no solo, obtendo, assim, uma massa pastosa ferrosa (NETO, 2009).

Com o passar das épocas, a manufatura de produtos ferrosos evoluiu do processamento mais primitivo para as modernas rotas produtivas de elevada eficiência, sempre com significativa propulsão tecnológica gerada nos períodos caóticos da sociedade humana, como nos períodos das grandes guerras.

Atualmente a produção brasileira de aço ocorre majoritariamente através de duas rotas mundialmente consolidadas, quais sejam: a produção integrada em aciarias a oxigênio (LD/BOF), a partir da redução do minério de ferro em altos-fornos (AF), e da produção semi-integrada em os fornos elétricos a arco (FEA), cuja matéria-prima fundamental é a sucata ferrosa (JOHN, 2009). Considera-se também um pequeno volume da produção brasileira obtida através de aciarias que operam fornos EOF (Energy Optimizing Furnace). Existem ainda processos como o de redução direta (RD) e redução-fusão (RF) que ocupam uma parcela no cenário mundial, porém com volumes de produção menores. Em seu trabalho, Flores (2011) descreve além dessas rotas produtivas, outras tecnologias emergentes para produção de aço na atualidade.

Na tabela 1 é possível verificar dados estatísticos da produção de aço no Brasil de acordo com cada processamento e na figura 1 o esboço esquemático simplificado das rotas produtivas integradas e semi-integradas citadas anteriormente.

Tabela 1 - Produção brasileira de aço bruto por processo de aciaria.

Fonte: adaptado, IABr (2011).

Processo / Process	Unid./Unit 10 <sup>3</sup> t					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Aciaria / Steelmaking Process						
Oxigênio (LD)/BOF	24.071	22.821	25.130	25.231	19.662	24.607
Elétrico/Electric	6.959	7.541	8.081	7.933	6.349	7.812
EOF	580	539	571	552	495	509
<b>TOTAL</b>	<b>31.610</b>	<b>30.901</b>	<b>33.782</b>	<b>33.716</b>	<b>26.506</b>	<b>32.928</b>

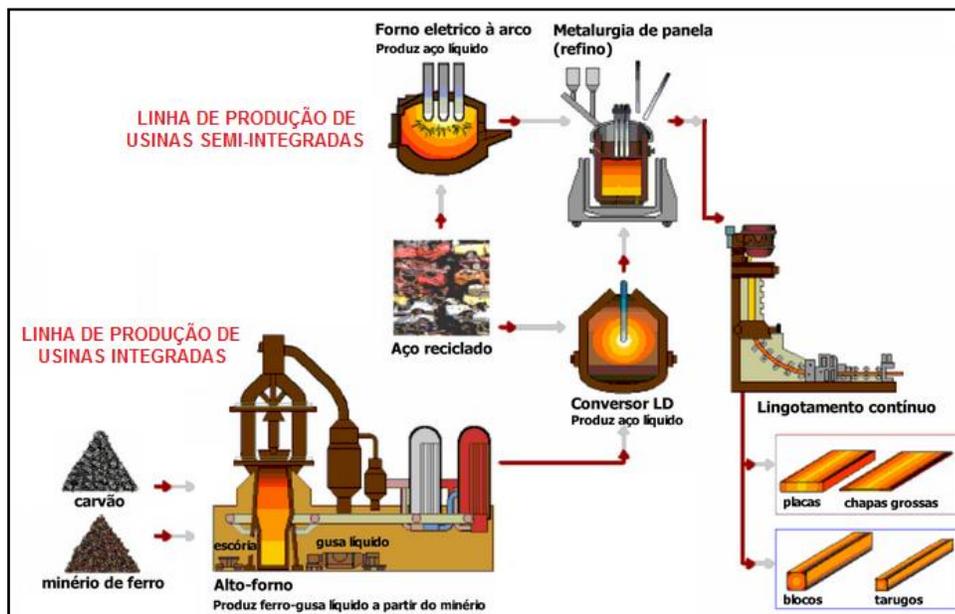


Figura 1 – Produção de aço pelas rotas produtivas integradas e semi-integradas.

Fonte: adaptado de Buzin, 2009.

### 3.2 A PRODUÇÃO DE AÇO EM USINAS INTEGRADAS A ALTO-FORNO A COQUE

A produção de aço pela rota integrada é historicamente a mais utilizada, alcançando índice médio de 75% do volume total produzido no Brasil, conforme apontado por IABr (2011). Nesta rota, opera-se basicamente com largas escalas de produção e tem-se o minério de ferro preparado na forma de pelotas ou sinter, ou ainda simplesmente beneficiado, sendo reduzido por reações promovidas pelo contato com gases redutores. Esses gases são originados a partir da queima do coque na zona de combustão dos altos-fornos. As reações de redução visam eliminar o oxigênio agregado à constituição do óxido de ferro, liberando o ferro para formar uma mistura rica em

carbono, que ao final do processamento recebe o nome de ferro-gusa. Para se tornar aço, o ferro-gusa na forma líquida necessita passar por um processo de refino, em um reator conhecido como conversor ou convertedor em aciarias à base de oxigênio. Nesta rota produtiva, fica evidente que a matriz energética básica é a energia fóssil, atualmente responsável pelos altos índices de poluição do ar atmosférico. Segundo Figueira (2007), esta rota é viável em plantas de larga escala de produção, variando de 2 a 10 milhões de toneladas ano, isto porque o capital investido por tonelada de aço produzido é muito elevado.

Em seu trabalho, Velloso (2006) descreve os aspectos operacionais, detalha o perfil interno, as diferentes zonas e reações tipicamente encontradas em um alto-forno. A figura 2 ilustra, de forma esquemática, o perfil da carga dentro de um alto-forno, o fluxo ascendente dos gases, reações e as diferentes regiões encontradas no interior do reator. Na figura 2 é mostrada uma foto de um alto-forno de uma planta siderúrgica.

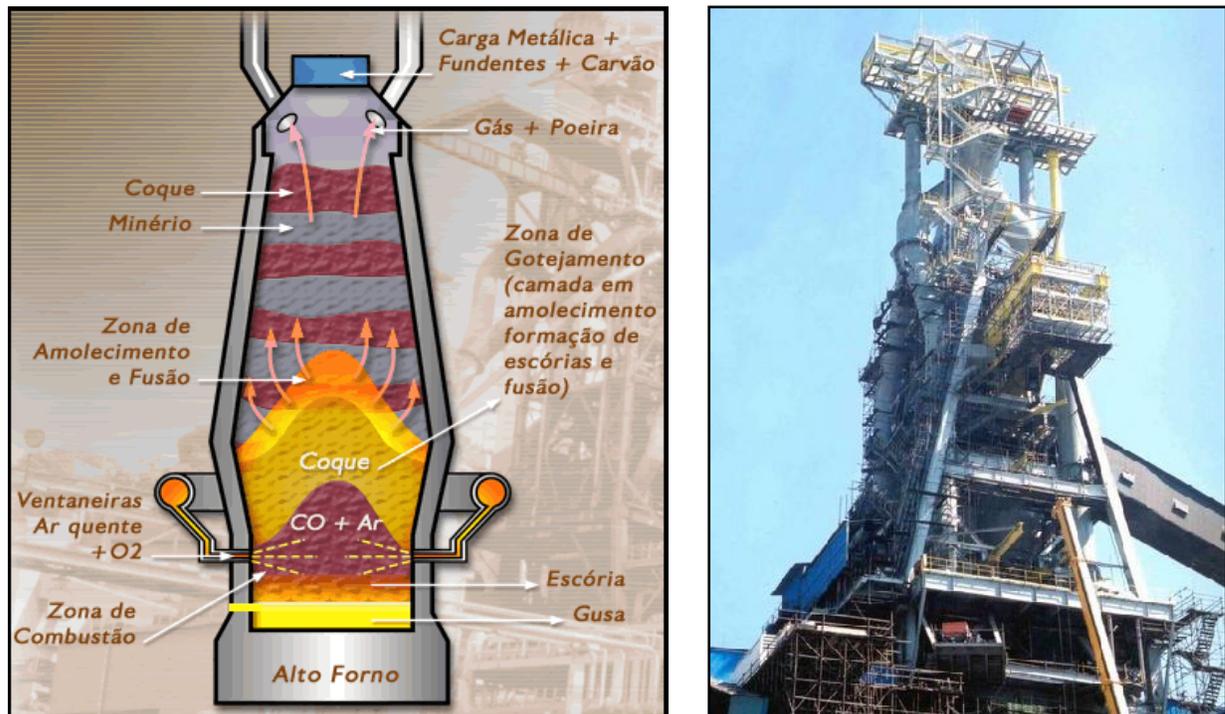


Figura 2 – Detalhe esquemático do interior de um alto-forno visto em corte, e foto de um alto-forno industrial.

Fonte: adaptado de Velloso, 2006.

### 3.3 A PRODUÇÃO DE AÇO EM USINAS MINI MILLS SEMI-INTEGRADAS

No início do século XX, o FEA era considerado um aparelho para fabricação de aços especiais como aços inoxidáveis e aços de alta liga, pois não era possível produzir esses aços em outro equipamento, uma vez que somente o FEA possuía precisão e controle de temperatura adequadas para as exigências destes materiais. Em 1909, surgiu o primeiro forno elétrico trifásico, com a carcaça semelhante à utilizada atualmente. Depois das duas grandes guerras, em meados da década de 40, o avanço tecnológico permitiu o aprimoramento desta rota, promovendo a produção de aço via aciaria elétrica em larga escala (FIGUEIRA, 2007).

Atualmente, o FEA tem sido cada vez mais utilizado para a produção de aço carbono, o que o colocou em sua posição técnica e econômica atual. O FEA é um aparelho excelente para fundir sucatas sem limites de proporção na carga, e a maioria destes fornos é totalmente alimentada por sucata. Infere-se, logicamente, que a abundância e o preço da sucata constituem um fator importante de custo do aço e a grande flexibilidade do FEA constitui uma de suas principais vantagens (CAMPOS, 1985). Hoje, o FEA é utilizado para produzir desde aços destinados à construção civil, perfis comerciais até produtos planos, passando pelos aços ligados. Portanto, este equipamento abrange a produção de aços para quase todas as grandes linhas de produtos que demandam o aço.

O processo de fabricação do aço inicia-se na aciaria e tem como principal matéria-prima o ferro, que pode estar em forma de: sucata, gusa (sólido e/ou líquido) ou materiais metálicos alternativos, como o ferro-esponja. Os principais objetivos do FEA são transformar a carga sólida em aço líquido, elevar a temperatura do aço líquido e executar o refino primário. Nestas operações, há um ponto em comum, que é a necessidade de fornecer calor ou energia. A figura 3, a seguir, mostra uma vista em corte que permite ter uma idéia das operações que ocorrem no interior do FEA.

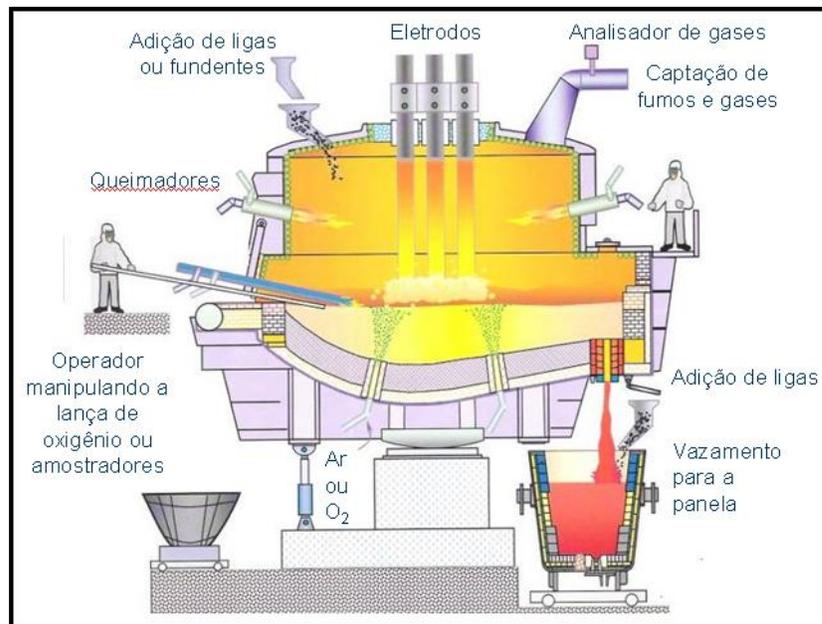


Figura 3 - Forno elétrico a arco visto em corte e operações associadas ao processo.

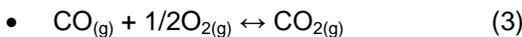
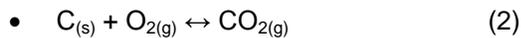
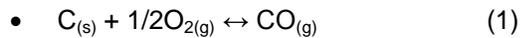
Fonte: Rizzo, 2006.

### 3.3.1 FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA) – FUSÃO E REFINO PRIMÁRIO

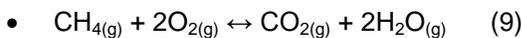
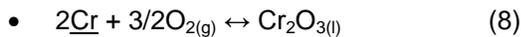
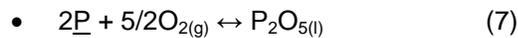
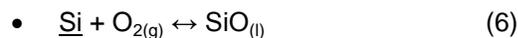
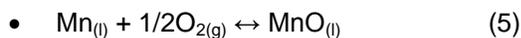
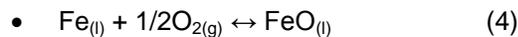
Na rota de produção através de fornos elétricos a arco (FEA), tem-se como matéria-prima básica a sucata metálica, a qual é carregada e submetida à fusão através de eletrodos condutores. A corrente elétrica é conduzida pelos eletrodos de grafita e transmitida à sucata por meio do arco elétrico, o qual libera intensa quantidade de energia. Basicamente, a carga metálica sólida entra em processo de fusão com um aporte de energia elétrica, e John (2009) detalhou em seus estudos os fenômenos elétricos envolvidos nesta operação. O FEA também é um reator capaz de gerenciar energias químicas quando em processamento. A partir de um determinado momento do processamento, quando já se tem um banho de aço líquido formado na soleira do FEA, ocorre a injeção de oxigênio neste banho, promovendo reações de oxidação. As reações de oxidação, de caráter exotérmico dos diversos elementos presentes na composição do banho líquido, são responsáveis pela formação de uma escória com intensa liberação de energia química ao processo, sobretudo a oxidação do carbono, e contribuem decisivamente para redução do consumo de energia elétrica. Evidentemente, a quantidade de energia química que será obtida está diretamente

ligada à quantidade de sucatas ou materiais carburantes presentes na carga sólida. As principais reações químicas que se desenvolvem ao longo do processamento de uma corrida já se encontram descritas em forma de equações em inúmeros trabalhos (NETO, 2009):

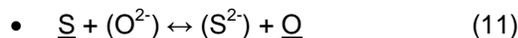
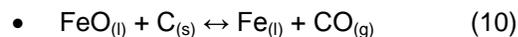
- Reações de combustão parcial, completa e pós-combustão, nesta sequência:



- Reações de oxidação dos elementos formadores de escória, ferro, manganês, silício, fósforo, cromo e do gás natural, nesta sequência:



- Reações de redução de óxido de ferro e enxofre, nesta sequência:



A oxidação do carbono exerce um papel de grande importância durante o refino, pois o produto de sua oxidação é o gás monóxido de carbono, CO, que promove uma grande agitação do banho metálico, acelerando a cinética de outras reações de oxidação e promove a homogeneização da temperatura e composição química do banho. Devido a grande importância do carbono, é necessário acrescentar uma quantidade extra deste elemento no banho quando seu teor na sucata for muito baixo. Esta adição ocorre através da utilização de ferro gusa sólido, injeção de grafite em pó.

Outro elemento que merece destaque nesta etapa do processo é o fósforo, cujo teor final na composição do aço é função da temperatura do banho, basicidade e teor de FeO na escória. Em temperaturas muito elevadas ou baixos níveis de FeO na escória, o fósforo retornará para o banho. A prática de lastro ou fundo úmido também contribui de forma significativa para a desfosforação, uma vez que, oxigênio pode ser injetado enquanto o banho apresenta temperaturas relativamente baixas e a escória presente neste momento apresenta elevados teores de FeO oriundo da corrida anterior. Elevada basicidade da escória, ou seja, alto teor de CaO, contribui para a desfosforação, no entanto, deve-se tomar cuidado para que a escória não se torne saturada de CaO, pois isso acarretaria no aumento de sua viscosidade, o que diminui a sua eficiência em remover o fósforo do banho, já que tal reação ocorre na interface banho metálico e escória. É comum o uso de fluorita com o objetivo de diminuir a viscosidade da escória, aumentando a cinética da reação.

O grande desafio encontrado na etapa de refino primário no FEA é a manutenção de uma escória capaz de fixar as impurezas oxidadas no banho metálico e que possua características tais que não promovam o desgaste efetivo do revestimento refratário. O tempo de refino oxidante é proporcional aos teores iniciais e finais de impurezas, com isso, fica claro o grau de importância da composição química da alimentação do forno (carga fria). O controle da composição química da alimentação do forno também é muito importante por minimizar os teores de elementos que não são eliminados na etapa de refino tais como cobre, níquel e estanho.

Todas as energias adicionadas no forno precisam ser introduzidas de forma eficiente, para que se obtenham ganhos de custos e qualidade (CHEVRAND, 2007). Inicialmente, quando a sucata é carregada, o processo de fusão se inicia através da energia elétrica, fornecida através de sistemas elétricos (geradores, transformadores, linhas de distribuição). Esta energia é conduzida pelos eletrodos gerando um arco elétrico e é transferida para a carga metálica sob a forma de calor, provocando a fusão da carga sólida e a elevação de temperatura do aço líquido. O calor transferido por condução, convecção e radiação pode ser gerado eletricamente ou quimicamente.

Este segmento da siderurgia promove intensa reciclagem de sucatas, retirando da natureza uma enorme quantidade de material ferroso obsoleto, sobras da indústria

de base e metal-mecânica. A sucata de aço é o material mais reciclável e reciclado do mundo (KOROS, 2003). Segundo dados atualizados do Instituto Aço Brasil (IABr), esta rota de produção é responsável por cerca de 24% da produção total de aço no Brasil, conforme dados de produção apontados no Anuário Estatístico (2011). Na figura 4, é possível verificar o ciclo da geração de sucata de aço, bem como das suas rotas de reciclagem mais comuns.

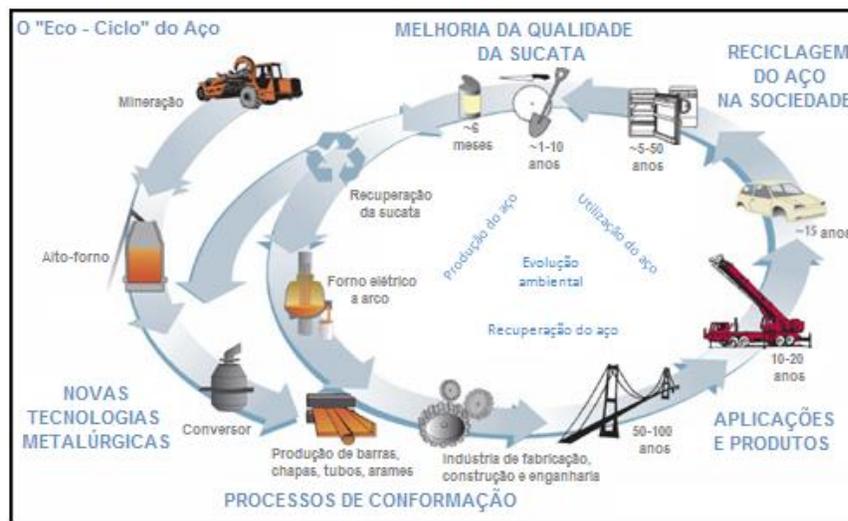


Figura 4 - Ciclo da geração de sucata de aço e rotas de reciclagem.

Fonte: adaptado de Jernkontoret,

[http://www.jernkontoret.se/english/research/the\\_steel\\_eco\\_cycle/index.php](http://www.jernkontoret.se/english/research/the_steel_eco_cycle/index.php).

Chevrant (2007) afirma que, dependendo de sua origem, a sucata apresenta densidade e formas diferentes. Esta densidade pode variar entre  $0,6 \text{ t/m}^3$  para as sucatas leves não industrializadas, até  $1,5 \text{ t/m}^3$  para as sucatas mais pesadas e que geralmente passaram por algum processo para melhorar suas propriedades. Dentre os benefícios do emprego da sucata para produção de aço, podem ser destacados:

- Propriedades magnéticas que facilitam a manipulação e a segregação dentre os demais materiais, como impurezas não metálicas por exemplo. Por meio

desta característica, a sucata ferrosa pode ser separada de outros materiais por meio de processos eletromagnéticos, de forma rápida e com baixo custo;

- Não há restrições quanto à reutilização, ou seja, não perde ou reduz suas propriedades quando reciclado, independente da quantidade de ciclos de reciclagem ao qual possa ter sido submetido;

- Promove a preservação de recursos naturais e energia, prolongando a vida útil de reservas naturais de minério de ferro, calcário, carvão e demais insumos necessários na produção. Segundo Sakamoto (1999), o gasto energético é significativamente inferior ao processo de redução de minério de ferro e, por estas razões, reduz custos produtivos;

- Evita emissões inerentes ao processo de extração e beneficiamento das matérias-primas, não necessita dos grandes volumes de combustíveis fósseis normalmente utilizados nos altos-fornos e, conseqüentemente, contribui de forma definitiva para redução nos níveis de CO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera.

A sucata de aço, portanto, já conquistou consagrado espaço no mercado de matérias-primas para produção de aço em aciarias elétricas, como carga metálica para FEAs (JOHN, 2009). Cabe destacar que, mesmo aciarias que produzem aço a partir do refino do ferro-gusa líquido, em conversores a oxigênio LD/BOF, também utilizam sucata como parte da sua carga, porém neste caso como uma parcela minoritária. A sucata atua como elemento refrigerante no processo e pode ser empregado em percentuais de até 20%. Outro segmento de mercado que consome sucatas de aço são as fundições, que produzem toda sorte de ferros fundidos, que em função do alto valor agregado dos seus produtos, acabam adquirindo no mercado as melhores qualidades de sucatas disponíveis, por vezes até mesmo inflacionando este mercado. Por todos estes motivos, as sucatas ocupam uma posição destacada e valorizada no mercado, com escalas diferenciadas em função de cada qualidade, grau de limpidez e custos de beneficiamento, conforme apontado por Sandberg (2005).

Atualmente no Brasil são recicladas aproximadamente 8 milhões de toneladas de sucata por ano, material este que estaria disposto na natureza caso não fosse empregado nestas rotas de produção. A figura 5 ilustra pilhas de sucatas que serão consumidas em fornos elétricos e a tabela 2 informa os valores atualizados da geração, compras e consumo de sucata no mercado brasileiro segundo volumes atuais.



Figura 5 – Pilhas de sucata para consumo em forno elétrico a arco.

Fonte: Gerdau, 2012.

Tabela 2 – Geração, compras e consumo de sucata no mercado brasileiro.

Fonte: Adaptado, IABr (2011).

Ano	Geração Interna	Unid./Unit 10 <sup>3</sup> t			
		Aquisição no Mercado Interno	Consumo	Importação	Exportação
2001	3.099	4.024	7.074	11	13
2002	3.305	4.267	7.320	13	13
2003	3.291	5.185	8.128	59	10
2004	3.467	5.436	8.487	68	13
2005	3.083	5.131	8.125	92	12
2006	2.973	5.847	8.544	56	34
2007	2.876	6.315	8.853	46	85
2008	3.423	6.396	9.405	44	119
2009	2.229	5.115	7.452	28	115
2010	2.396	6.404	8.660	134	81

### 3.3.2 FORNO-PANELA (FP) - REFINO SECUNDÁRIO DO AÇO

O refino secundário do aço pode ser realizado através de processos de aquecimento por reações químicas ou através da utilização de energia elétrica, como é o caso do forno-panela. A própria panela é utilizada como reator para as operações e, semelhantemente ao FEA, os eletrodos de grafita são responsáveis pela transferência de energia e conseqüente aquecimento do aço líquido. No Brasil, o forno-panela é o equipamento mais utilizado para a realização deste processo. Nesta etapa, ocorre a desoxidação e dessulfuração do aço líquido, adição de elementos de liga, ajuste e correção da composição química, e atingimento da temperatura necessária para um processo de solidificação estável no lingotamento contínuo. A intensa agitação mecânica promovida pela injeção de gases inertes pelo fundo da panela garante a homogeneização do banho em termos de composição química e temperatura, tornando este um componente básico para o processo. Em seu trabalho, Bruch (2012) descreve em detalhes todo processamento do aço via FP.

Ao final do refino secundário deve-se obter uma corrida com composição dentro das especificações requeridas para cada qualidade de aço. A Figura 6 é uma representação esquemática de um sistema de forno-panela.

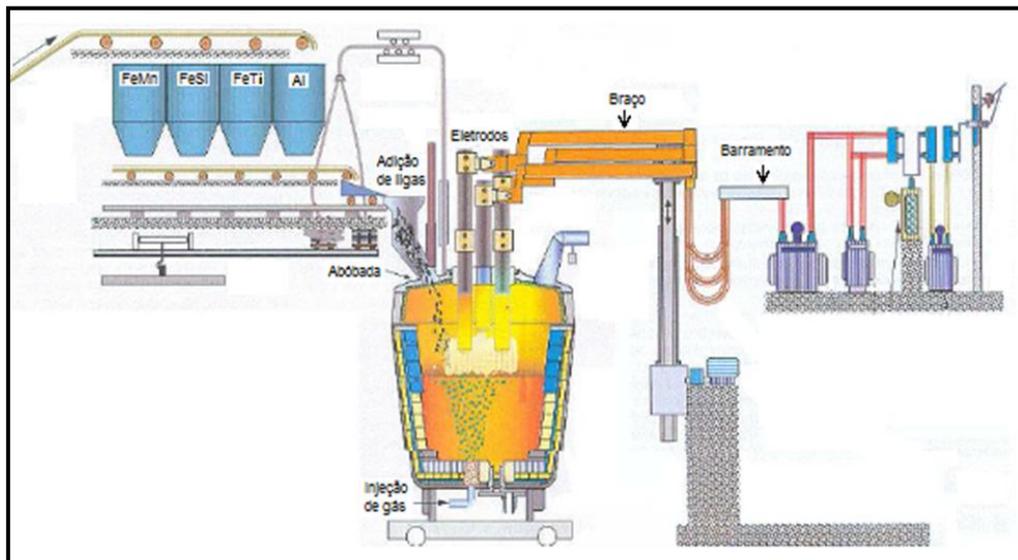


Figura 6 - Forno-panela visto em corte e operações associadas.

Fonte: Rizzo, 2006.

Em usinas produtoras de aços especiais ou de aços planos, o refino secundário é acrescido de etapas de processamento que operam sob vácuo.

### 3.3.3 LINGOTAMENTO CONTÍNUO (LC) - SOLIDIFICAÇÃO DO AÇO

Seja qual for a rota adotada para produção de aço, obtem-se um produto solidificado na forma de tarugos, placas ou lingotes, variando de acordo com o processo de solidificação adotado na aciaria. O processo de solidificação mais produtivo e, portanto, com larga escala de utilização é o lingotamento contínuo (LC).

O processo de lingotamento aumentou sua participação na produção de aço por assegurar notáveis vantagens sobre o processo convencional, permitindo a eliminação de uma série de etapas intermediárias entre o aço líquido e o semi-produto, resultando em um menor custo operacional, menor consumo de energia e maior produtividade. Em seu trabalho, Silva (2003) aborda aspectos técnicos do processo e detalhes de uma máquina de lingotamento contínuo. Neste processo, o aço é solidificado continuamente em uma máquina dotada de um sofisticado sistema de refrigeração, reproduzido de forma esquemática na figura 7.

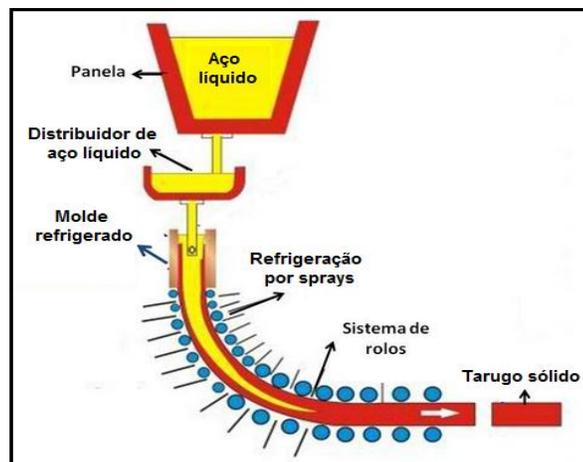


Figura 7 – Solidificação de aço líquido no processo de lingotamento contínuo.

Fonte: Adaptado de Silva, 2003.

À medida que o aço solidifica na máquina de LC, já é possível observar a formação e desagregação de carepa nos tarugos e placas ao longo da sua trajetória, o que pode ser verificado na figura 8.

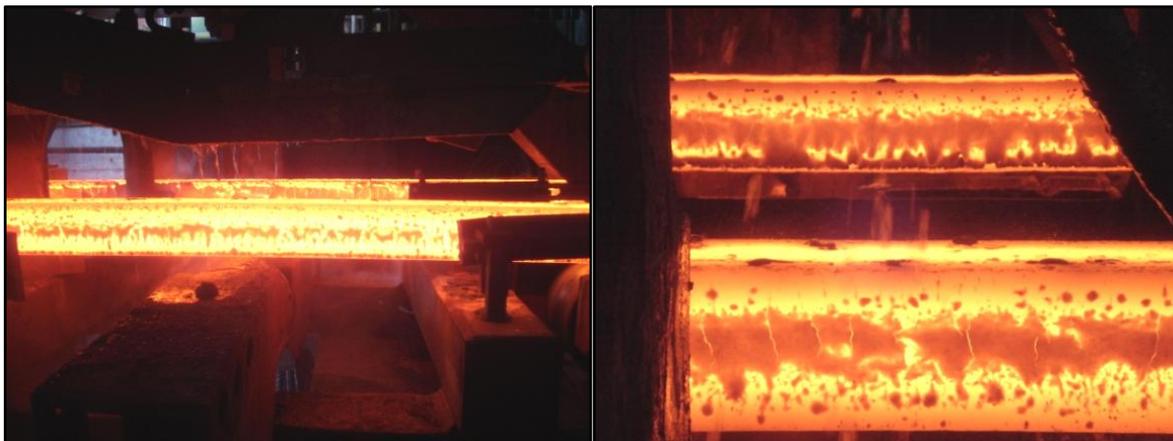


Figura 8 – Formação da carepa ao longo do tarugo no resfriamento no LC.

Fonte: Gerdau, 2012.

Esta se desprende ao longo da sua trajetória, acumulando-se no leito de resfriamento, e por fim a carepa é conduzida por correntes de água para um poço, onde será possível realizar seu recolhimento, como pode ser visto na figura 9.



Figura 9 – Poço de acumulação e coleta de carepa do LC.

Fonte: Gerdau, 2012.

### 3.4 LAMINAÇÃO DE AÇOS LONGOS

Em seu trabalho, Rodrigues (2012) mostra o processo de laminação como um dos processos de transformação mecânica de metais mais utilizado, apresentando alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso. Na produção de aços longos, a laminação recebe como matéria-prima os tarugos solidificados no lingotamento contínuo da aciaria, podendo inclusive recebê-los ainda quentes para o seu enformamento, uma prática muito comum que busca otimização energética. Ao final deste processamento, objetiva-se produto com tamanho e forma que atenda as normas de propriedades mecânicas especificadas em normas e tenha condições superficiais adequadas para o fim a que se destina. A laminação de longos pode entregar tanto um produto acabado como barras, perfis, vergalhões ou um produto intermediário como é o caso do fio máquina.

O processo de laminação se dá pela passagem do tarugo entre pares de cilindros com geratriz retilínea (DIETER, 1988), os quais estão posicionados em equipamentos chamados gaiolas. Uma sequência de gaiolas forma um trem laminador, o qual pode ter dezenas ou centenas de metros. Para proporcionar os esforços necessários à sua conformação, a distância entre os pares de cilindros deve ser menor que a espessura inicial da peça metálica, sendo que os pares de cilindros podem conter canais entalhados de forma mais ou menos complexa, conforme especificação do produto final. A figura 10 mostra, de forma esquemática, os cilindros de laminação e uma gaiola de laminação.

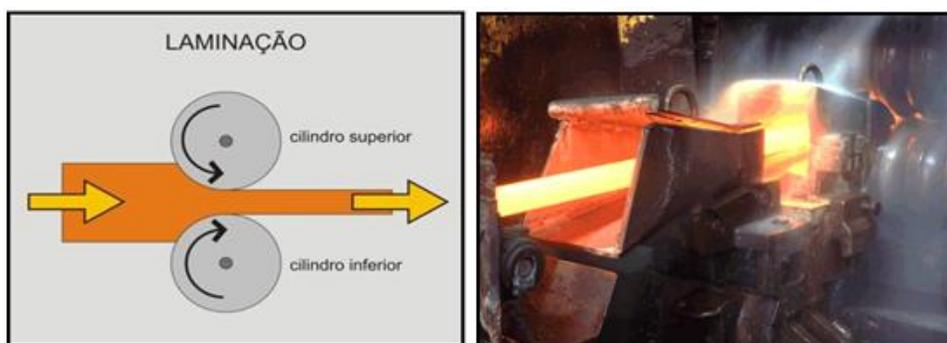


Figura 10 – Desenho esquemático do processo de laminação e foto de uma gaiola.

Fonte: Adaptado de Rodrigues, 2012.

Na laminação, o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos cilindros e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os cilindros e o material. As forças de atrito são também responsáveis pelo ato de "puxar" o metal para dentro dos cilindros. Estes elementos mecânicos em movimento de rotação, acionados pelo conjunto de motores e caixas de transmissão, geram energia suficiente para causar a deformação plástica do aço trabalhado.

Os tarugos, como salientado, podem ser enfiados à quente quando saem diretamente da etapa do lingotamento contínuo, aproveitando sua elevada temperatura e obtendo ganhos energéticos consideráveis. Entretanto, estes materiais precisam ser aquecidos, em fornos de reaquecimento, até atingirem a temperatura ideal para serem introduzidos no laminador. Tal temperatura é chamada de temperatura de trabalho, a qual se situa acima da temperatura de recristalização, onde o aço assume a capacidade de conformação plástica (CODA, 2007). Desde o forno de reaquecimento e ao longo de todo o trem de laminação, ocorre a formação e desprendimento de carepa, a qual é conduzida por meio de dutos, através de água, para um poço de acumulação para posterior recolhimento, tal como ocorre no lingotamento contínuo. A figura 11, abaixo, ilustra a dimensão em formato panorâmico de um trem de laminação, que é formado por um conjunto de gaiolas laminadoras.

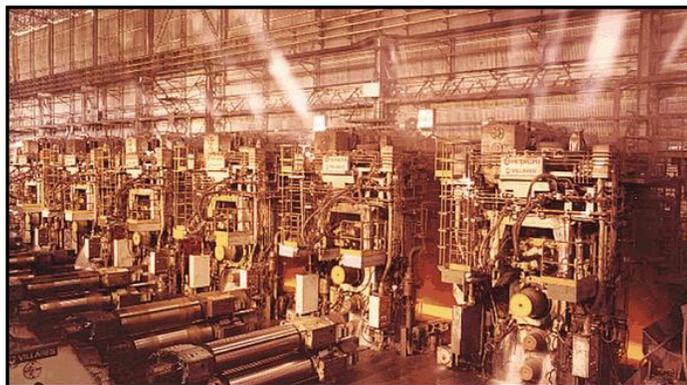


Figura 11 – Vista panorâmica de um trem de laminação e suas respectivas gaiolas.

Fonte: Coda, 2007.

### 3.5 RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

Os resíduos gerados ao longo da cadeia siderúrgica são apresentados na tabela 3, correlacionando o panorama mundial em comparação com o cenário de geração existente no Brasil.

Tabela 3 – Resíduos gerados na indústria siderúrgica mundial e brasileira.

Fonte: Cunha, 2006.

	Mundo		Brasil
	kg/t gusa ou aço	Milhões t/ano	Milhões t/ano
Recicláveis	43	30	1,2
Poeira de alto-forno	1 a 2 (***)	0,5 a 1,0	0,2 a 0,04
Lama de alto-forno	< 1 (***)	~ 0,2	~ 0,001
Poeira de sinterização	15	7	0,3
Finos de coque	-	-	-
Lama grossa do conversor	5-6	2,5	0,1
Lama fina do conversor	17	8	0,34
Carepas	10-20	7	0,3
Poeira aciaria elétrica	15	4,6	0,07
Escória alto-forno	150 a 350 (300)	140	6,0
Escória conversor	100	47 (**)	2,0 (**)
Escória lingotamento contínuo	30-35	17 (**)	0,7 (**)

(\*) 60% aço por conversor e 40% por aciaria elétrica

(\*\*) 80 e 20% respectivamente

(\*\*\*) Pós e lamas p/ produção de gusa = 16,9 kg/t e para aciaria = 16 kg/t

Martins (2005) revela a necessidade inquietante de tratar resíduos visando eliminar o impacto ambiental causado, bem como a necessidade de evolução de processos que permitam o aproveitamento parcial ou total dos mesmos de forma economicamente viável. Estes temas são objeto de estudos em diversos segmentos industriais, sobretudo no setor siderúrgico. A caracterização de um material como rejeito industrial está associada à tecnologia disponível para o processamento do mesmo. A partir do momento em que se dispõe de um método limpo, econômico e eficiente para processamento e recuperação do rejeito, este assume a posição de matéria-prima e deixa de ser considerado como rejeito. Na verdade, o intento de se tratar o rejeito de um processo para a recuperação total ou parcial de quaisquer de seus componentes, já

estabelece a consideração de que o mesmo é um resíduo, ou seja, um produto remanescente do processo que o gerou. Se o processo utilizado na recuperação é economicamente viável pode-se considerar esse resíduo como matéria-prima, e em alguns casos é possível até mesmo a geração de receitas neste processamento.

Segundo definições do Dicionário Aurélio (FERREIRA, 1982), existem diferenças significativas entre rejeito, resíduo e matéria-prima: rejeito representa o que é lançado fora, largado, deposto, desprezado, tem pouca ou nenhuma conta; resíduo é aquilo que resta de qualquer substância, remanescente, produto parcial, qualquer substância que sobra de uma operação industrial e que pode ainda ser aproveitada industrialmente; matéria-prima é uma substância bruta principal e essencial com que é fabricada alguma coisa. Portanto, a definição de resíduo fica restrita aos materiais que têm utilização técnica e economicamente viável, uma vez que no conceito moderno, os chamados coprodutos são materiais gerados secundariamente em operações industriais, sendo, portanto, resíduos para os quais foram desenvolvidas tecnologias que permitem sua reutilização, de forma ambientalmente adequada, caracterizando-o como matéria-prima ou fonte de energia.

Uma grande parcela dos resíduos industriais é considerada rejeito até que seja possível o seu tratamento devido, e através da segregação dos seus componentes essenciais, este passa a ser novamente considerado matéria-prima em outros processos (KOROS, 2003). O conceito fundamental é considerar todo e qualquer rejeito siderúrgico como resíduo, e portanto, como uma matéria-prima ainda não aproveitada. Essa teoria toma forma a cada dia, à medida que os recursos naturais mostram sinais de esgotamento e obrigam as indústrias a uma forçada adaptação dos processos e, fundamentalmente, uma urgente atenção ao eminente colapso do ecossistema. Do ponto de vista ambiental, cada operação dentro de uma usina siderúrgica está associada ao consumo de matérias-primas, insumos e energia, gerando por sua vez, resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Estes resíduos podem ser classificados em três grupos: os ditos recicláveis contendo ferro, os resíduos carboquímicos e as escórias.

A recuperação dos valores metálicos contidos nos resíduos sólidos acima mencionados passou a ser muito importante, tanto do ponto de vista das restrições

legais impostas pelas legislações relativas à proteção do meio ambiente, como do ponto de vista econômico, por contribuírem para a compensação dos custos de instalação e operação de equipamentos antipoluição instalados nas usinas (TAKANO, 2000). Outros resíduos sólidos são os fragmentos de escórias geradas na fabricação do gusa, do aço e resultante do lingotamento contínuo do aço. Dependendo da procedência da escória, elas podem ser recirculadas, estocadas ou comercializadas para a indústria cimenteira ou da construção civil (agregados).

O setor de construção civil já constitui uma consagrada e disseminada alternativa para emprego de alguns resíduos provenientes de operações siderúrgicas como, por exemplo, as escórias granuladas de alto-forno provenientes da produção do ferro-gusa, utilizadas na fabricação de cimentos Portland (MOURA, 2000). Alternativas para a utilização de subprodutos decorrentes da fabricação do aço, como a escória de aciaria elétrica (MASUERO, 2001) e a própria carepa de aço, têm logrado êxito. Atualmente, a indústria cimenteira já é capaz de absorver um elevado percentual de carepa, introduzindo-a na composição dos cimentos sem perda de qualidade e viabilizando a redução do consumo de matérias-primas naturais e os impactos decorrentes da sua extração no meio ambiente. Contudo, a necessidade de beneficiamento e os custos envolvendo transporte de carepa até as usina de produção de cimento ainda forçam estudos para que se direcione a carepa para consumo interno, nos equipamentos e reatores existentes dentro das plantas semi-integradas.

### **3.5.1 AGREGADO SIDERÚRGICO**

A gestão ambiental da escória de aciaria, assim como de outros resíduos, deve ser entendida como uma filosofia de gerenciamento observando-se igualmente critérios técnicos, econômicos e ambientais associados à sua geração, manuseio, processamento, estocagem e destinação final (GEYER, 2001). Os critérios técnicos do processamento e destinação final devem fundamentar-se na melhor tecnologia disponível e aplicável à rota selecionada. Já os critérios econômicos conferem sustentabilidade ao sistema, e os ambientais previnem possíveis impactos que são

nocivos ao ecossistema, além de preservar os recursos naturais.

As escórias de alto-forno e de aciaria são os maiores volumes de resíduos gerados em usinas siderúrgicas e são, depois da sucata, o maior foco de recuperação e reciclagem de resíduos dentro da indústria do aço. Atualmente, possuem uma larga utilização em outros processos industriais, e até mesmo emprego “*in natura*”. Com relação às quantidades de escórias geradas no processamento do aço, a escória de alto-forno é produzida na proporção de 200 a 300 kg por tonelada de aço, ao passo que a escória de aciaria entre 116 a 120 kg por tonelada de aço. São os resíduos sólidos de maior volume gerados na cadeia produtiva do aço (TAKANO, 2000). Contudo, seu emprego não é maior devido à competição com produtos naturais (calcário), alto custo do frete, necessidade de regulamentação e normalização.

Do ponto de vista tecnológico, os aspectos envolvidos na sua aplicação, e que precisam de especial atenção, são a granulação para escórias de alto-forno e o controle da expansão para escórias de aciaria. Evidentemente, tudo isto implica na valorização econômica do material, ou seja, o agregado siderúrgico deve ser entendido como um recurso mineral sintético. É recurso hoje o que não foi recurso ontem.

### **3.5.1.1 ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO A COQUE**

A escória de alto-forno é um subproduto inevitável nos processos siderúrgicos, pois resulta da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque (ou carvão) e do calcário ou dolomito utilizados como fundentes. Uma das principais formas de utilização da escória de alto-forno, consiste no uso de suas propriedades cimentícias (SILVA, 2010), as quais são associadas à reatividade da escória de alto-forno em sua forma vítrea. Outras aplicações dependem das características resultantes do tipo de resfriamento e composição química, podendo ser empregadas em bases de estradas, no asfalto, em aterros e terraplanagem, como agregado para concreto, além de aplicações especiais (lã mineral, lastro ferroviário, material para cobertura, materiais cerâmicos, isolamento, vidro, filtros, condicionamento de solo e produtos de concreto).

Atualmente, o maior mercado para a escória granulada de alto-forno é a construção civil. No processo de fabricação de cimento, por exemplo, a escória granulada de alto-forno é utilizada para substituir parte do clínquer consumido, reduzindo-se de forma significativa a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera durante o processo de produção. Conseqüentemente, traz a redução da demanda de exploração de reservas naturais de calcário e argila, matérias-primas para obtenção do clínquer.

Para esta substituição, a escória deve passar por um processo para tratamento para adequação ao uso nos cimentos, ou seja, necessita de um beneficiamento antes da adição aos cimentos tipo Portland. O processo consiste, basicamente, em passar as escórias por uma grelha, retendo fragmentos metálicos de grande porte, em seguida, esta escória será cominuída por um britador. Após a passagem pelo britador, o material será submetido a um eletroímã para remoção de fragmentos ferrosos. A mistura da escória granulada moída com o clínquer Portland é uma das formas mais consagradas de reciclagem da escória (JOHN, 2000). Atualmente, a reciclagem na produção de cimento consome boa parte das escórias geradas no Brasil, mas ainda existem sobras significativas e enormes pilhas de estoque.

### **3.5.1.2 ESCÓRIAS DE ACIARIAS ELÉTRICAS**

A primeira escória a ser formada na aciaria elétrica é a escória oxidante. Produzida no FEA, é uma solução líquida resultante da mistura dos fundentes e dos diversos óxidos formados pelas impurezas contidas na sucata e dos elementos metálicos do banho líquido. Esta escória tem como função promover o ajuste primário da composição química e a desfosforação do aço líquido quando em processamento no FEA.

Um segundo tipo de escória produzida dentro de uma aciaria é a escória redutora, a qual é formada no forno panela posteriormente ao vazamento do aço líquido do FEA, pela adição de cal e desoxidantes. Sua função é realizar a dessulfuração e a desoxidação do aço líquido, favorecendo o ajuste final da composição química do mesmo através da adição de ferro ligas. A figura 12 ilustra as etapas de geração de

escória em uma aciaria elétrica e os volumes médios obtidos para escórias oxidantes e redutoras.

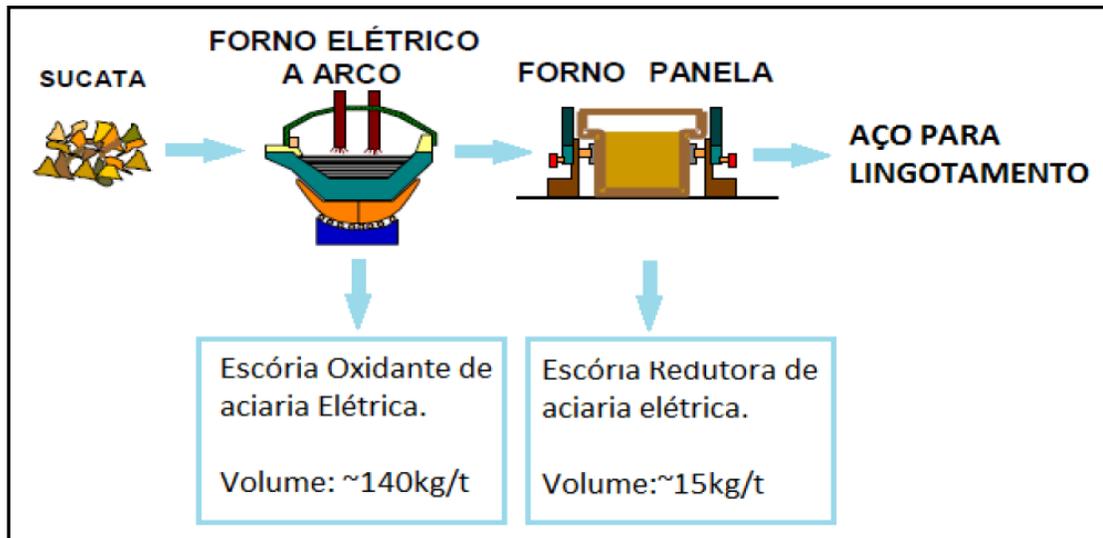


Figura 12 - Geração de escórias oxidantes e redutoras em uma aciaria elétrica e volumes médios obtidos.

Fonte: Rocha, 2011.

Apesar da composição química da escória de aciaria elétrica ser diretamente relacionada ao tipo de aço produzido, tipo de revestimento refratário utilizado e características da sucata utilizada como matéria-prima, no Brasil, estatisticamente, sua composição varia conforme tabela 4.

Tabela 4 – Variação de composição química de escórias oxidantes e redutoras.

Fonte: Adaptado de Geyer, 2001.

	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	FeO (%)	MnO (%)	SO <sub>2</sub> (%)
Refino Oxidante	30-35	8-12	15-20	3-9	25-35	3-6	-
Refino Redutor	45-55	8-12	20-25	3-9	0,5-3,5	0,5-3,5	0,5

A escória oxidante outrora simplesmente estocada em aterros, atualmente é beneficiada e gera uma ampla variedade de produtos com diversas aplicações, sendo considerado um co-produto da atividade siderúrgica e, portanto, visto como agregado siderúrgico (TAVARES, 2012). Sua utilização tem contribuído para a preservação dos recursos minerais não renováveis, visto que é um produto que substitui os agregados naturais provenientes da mineração de britas de granito, gnaisses, basaltos, calcários e outros materiais não metálicos extraídos da natureza.

Segundo Von Krüger (1995), o agregado siderúrgico é normalmente utilizado em pavimentações (sub-base, base, capa asfáltica), lastro ferroviário, artefatos de concreto (blocos, tubos, guias, blocos intertravados, etc.), contenção de encostas (rip-rap), gabiões, drenagens, fertilizantes e corretivo de solos. Todas as aplicações citadas possibilitam a substituição total ou parcial do agregado natural (brita de material pétreo) e os impactos que possam resultar do processamento da escória são menos significativos que as operações de extração da brita e consomem menos energia.

Por serem predominantemente básicas, ou seja, com alto teor de CaO em composição, limitam sua aplicação na formação de leitos de estradas. Por ter higroscopicidade alta, a adsorção de água em sua estrutura provoca aumento de volume, rachaduras e rupturas, enfraquecendo a resistência estrutural, mas na área de recomposição de basicidade de solo, bem como na de fabricação de fertilizantes, as mesmas passaram a ter significativa atuação.

Os estudos de Geyer (2001) revelam o estado da arte na questão da expansão volumétrica da escória de aciaria elétrica. No entanto, este material tem sido empregado no Brasil em pavimentação há décadas, regulamentado pelas normas técnicas competentes. A Norma DNER-ES 313/97 regulamenta o uso da escória de aciaria como agregado graúdo na produção de concreto betuminoso. Ainda as Normas DNIT-EM 262/94 e DNIT-PRO 263/94 especificam a expansão volumétrica aceitável para a utilização do material em pavimentação rodoviária, o que demanda a necessidade de acumular o agregado siderúrgico em grandes pilhas por um determinado período de tempo a fim de proporcionar sua estabilização, como pode ser visto na figura 13.



Figura 13 – Pilha de agregado siderúrgico estocado aguardando período de estabilização.

Fonte: Gerdau, 2012.

As principais características do agregado siderúrgico são expostas a seguir:

- Elevada resistência mecânica, aliada a uma textura rugosa e uma morfologia de alta cubicidade, favorecendo maior tração e, conseqüentemente, maior atrito;
- Estrutura física caracterizada por uma elevada densidade e porosidade acentuada;
- Coloração predominantemente cinza clara;
- Elevada resistência a variações climáticas e à abrasão, ocasionando menor desgaste e, conseqüentemente, maior permeabilidade;
- Alta estabilidade com longa durabilidade (vida) para todas as aplicações;
- Inexistência de material orgânico, atuando como inibidor natural para a vegetação;
- Intertravamento automático, produzindo uma superfície estável (excelente

tração), em virtude de seu formato cúbico;

- Alto peso específico, proporcionando elevada resistência a movimentos laterais, especialmente útil em curvas e ladeiras;
- Baixo custo quando comparado aos seus concorrentes brita;
- Fonte inesgotável de recursos: geração contínua de grandes volumes garantindo o fornecimento do material.

Em estudos recentes, Tavares (2012) demonstrou que o histórico de utilização da escória de aciaria como agregado indica que não ocorrem impactos ambientais que alterem adversamente as condições ambientais naqueles locais onde se utilizou o material. Igualmente, não foram constatados riscos potenciais à saúde humana que se relacionassem ao contato ou uso da escória de aciaria. No entanto, como o agregado siderúrgico é um produto de baixo valor agregado considerando os usos consolidados, os custos de frete podem limitar significativamente o raio de atuação das vendas potenciais. Assim sendo, a competição se passa em base regional e o consumo do material é centralizado nas regiões siderúrgicas do país.

Outras questões importantes que interferem na viabilidade econômica dos mercados para agregado siderúrgico são a disponibilidade de materiais concorrentes e a economia regional. Em menor escala, a demanda por escória é influenciada pelas prioridades dos consumidores, que escolhem usar o agregado em função do preço, serviço e disponibilidade para oferta (GEYER, 2001). Dessa forma, a oferta é o fator mais importante, já que projetos de construção normalmente requerem grandes quantidades de material a um só tempo.

Algumas ações são necessárias para o melhor entendimento do uso do material, como angariar apoio dos órgãos ambientais para que sejam adotadas políticas e mecanismos de incentivo à reciclagem de materiais. Além disso, urge a necessidade de elaborar normas técnicas para o agregado siderúrgico e suas diversas aplicações, buscando o reconhecimento do governo e da sociedade como sendo um co-produto da siderurgia. Maiores estudos devem ser realizados para emprego do agregado siderúrgico em revestimentos asfálticos. Porém, pela tendência futura no campo

ambiental, com a dificuldade de exploração comercial de pedreiras e, no campo econômico, com a ampliação do pólo siderúrgico em todo o país, o agregado siderúrgico passa a ser uma excelente alternativa para emprego em camadas de pavimentação.

Ao contrário das escórias oxidantes, as escórias redutoras possuem restrições para emprego na construção civil, no uso como agregado para pavimentação e fabricação do cimento. Isso ocorre por causa da natureza expansiva originada pela presença do óxido de magnésio reativo, óxido de ferro, pela metaestabilidade do silicato dicálcico e, principalmente, pela presença de óxido de cálcio livre em sua composição. Devido a tais dificuldades, as pesquisas convergem para reintroduzir a escória redutora no forno elétrico a arco, como forma de reduzir o consumo de CaO adicionado como fundente a partir do reaproveitamento do CaO livre contido na escória redutora (ROCHA, 2011). No entanto, para isso são requeridos tratamentos prévios com intuito de viabilizar tal aplicação.

### **3.5.2 A CAREPA**

O volume de carepa gerada nas usinas siderúrgicas corresponde a aproximadamente 2% do total de aço produzido (UMADEVI, 2009). Em várias etapas do processamento siderúrgico, tem-se aço solidificado exposto a temperaturas elevadas e atmosfera oxidante, que é a própria atmosfera ambiente. Estas são as condições requeridas para formação da carepa, e são encontradas nas operações de lingotamento contínuo, laminação e trefilação, sendo que neste último caso, já em temperaturas bem inferiores às demais.

Conceitualmente, carepa é um co-produto oriundo da oxidação da superfície do aço quando submetido ao gradiente térmico, ao meio corrosivo ou à simples ação do tempo (CUNHA, 2006), portanto, ferro e oxigênio, quando combinados sob estas condições, originam uma casca sólida quebradiça composta principalmente por uma combinação de óxidos de ferro como a wustita (FeO), a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), exemplificado em detalhes na figura 14.



Figura 14 – Carepa de lingotamento contínuo e seu detalhe à direita.

Fonte: Gerdau, 2012.

Diferentemente de outros resíduos industriais, possuem baixas quantidades de impurezas agregadas, contudo, deve-se atentar para os métodos de coleta e estocagem para garantir este diferencial positivo. Na figura 15, pode-se verificar estocagem de carepa em recinto fechado, dotado de sistema de drenagem para preservar as características do co-produto.



Figura 15 – Carepa estocada sob galpão impermeabilizado.

Fonte: Gerdau, 2012.

A fase óxida predominante na composição de carepas é a wustita (FeO), apresentando uma proporção aproximada de 75%, e entre os óxidos de ferro, é a fase que tem a maior relação Fe/O. Neste ponto, verifica-se um paradoxo, pois este óxido não é estável termodinamicamente a temperaturas abaixo de 570°C.

Ocorre que devido às altas taxas de resfriamento impostas sobre o aço em processamento, não há tempo suficiente para wustita se transformar em magnetita e hematita, e dessa forma assume um estado metaestável de equilíbrio para se originar (ROSS, 1980). Assim sendo, a wustita se forma e não encontra tempo suficiente para evoluir no seu grau de oxidação, permanecendo como fase majoritária na composição da carepa.

A formação da carepa tem sido investigada em laboratório, e também na indústria, a fim de compreender as diferentes regiões associadas ao desenvolvimento das fases descritas anteriormente. No local de contato com o substrato, forma-se wustita em zonas distintas: porosa e densa. A zona porosa é dirigida pela cinética do crescimento da carepa, a partir da nucleação e multiplicação de sítios de wustita. Posteriormente, o crescimento das regiões subsequentes é conduzido pela difusão dos íons de ferro, originando então a zona de wustita densa e com surgimento da fase magnetita. Na camada mais externa, já em pleno contato com oxigênio atmosférico, forma-se uma fina camada de hematita e seu crescimento ocorre devido à difusão do íon oxigênio (ADOLFI, 2006).

A figura 16 mostra em detalhes a secção transversal da carepa formada sobre um substrato de aço em relação ao tempo decorrido em um experimento. O experimento foi conduzido em laboratório, com atmosfera ambiente e podem ser verificadas diferentes camadas na ordem de formação descrita anteriormente.

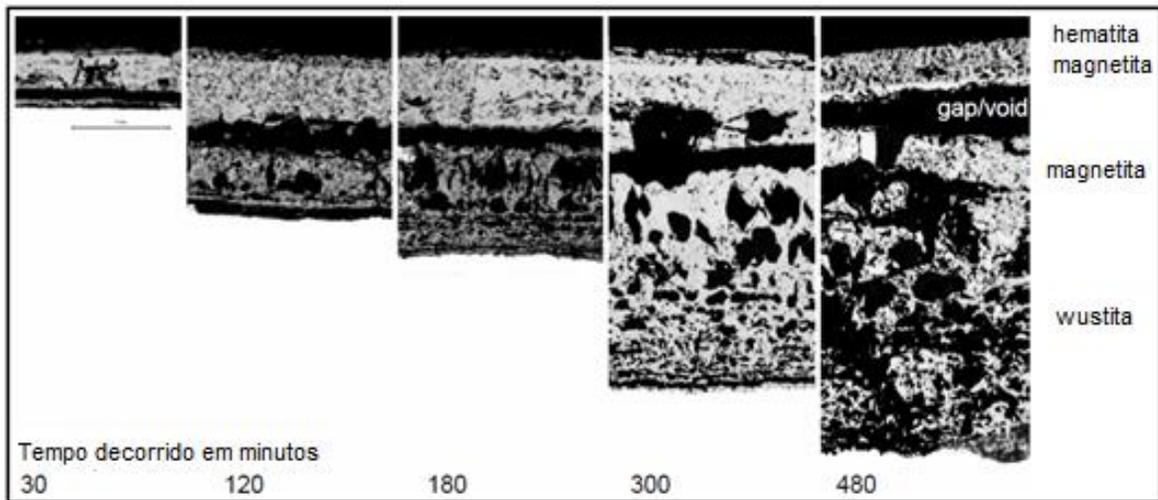


Figura 16 – Evolução dos óxidos na formação da carepa em função do tempo.

Fonte: Adaptado de Adolfi, 2006.

O grau de oxidação está associado com a quantidade e a forma como o oxigênio está quimicamente ligado ao ferro. Quando combinados, esses elementos formam os óxidos já citados anteriormente:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{FeO}$  conforme evolução do grau de oxidação. O  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é o único que tem composição fixa, e sua fórmula química corresponde exatamente à estequiometria indicada. Neste caso, tem-se que 60% dos átomos são oxigênio e 40% são átomos de ferro trivalentes. Por outro lado, o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  não tem uma estequiometria exata, pois apresenta mais oxigênio do que aquele indicado na fórmula química. Estequiométricamente, o teor de oxigênio deveria ser de 57,14% do total de átomos. Na realidade, o teor de oxigênio encontrado varia desde 57,66% até 58,02% dos átomos. O teor dos átomos de ferro varia entre 42,34% e 41,98%, quando deveria corresponder a 42,86%. O  $\text{FeO}$  também tem uma fórmula química que não corresponde à exata estequiometria. Seus teores de oxigênio vão de 51,26% até 54,57%, quando a estequiometria indica ser 50%. Ela não é estável abaixo de  $560^\circ\text{C}$ , conforme demonstrado no diagrama da figura 17. A presença de  $\text{FeO}$  na temperatura ambiente ocorre em estado metaestável, pode ser atribuída a um resfriamento brusco, conforme foi explorado em tópicos anteriores.

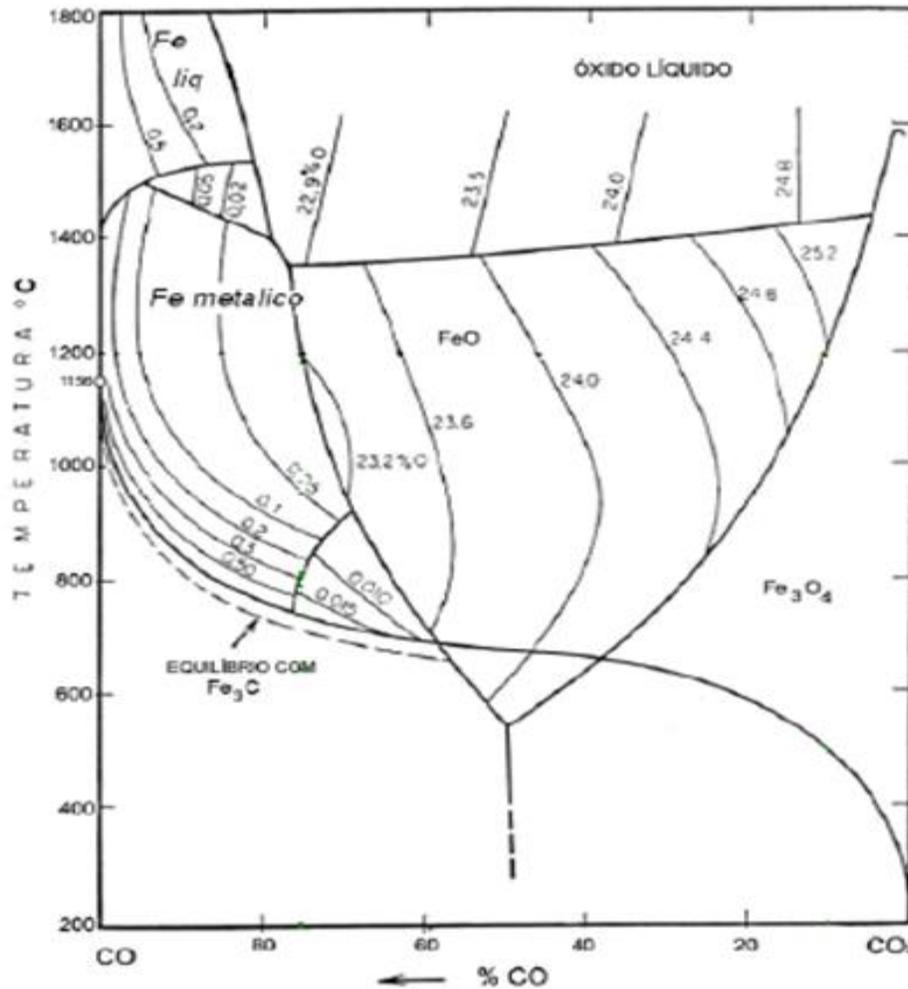
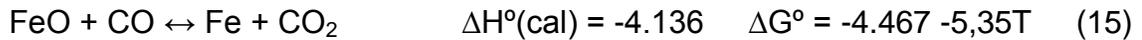
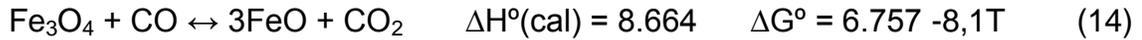
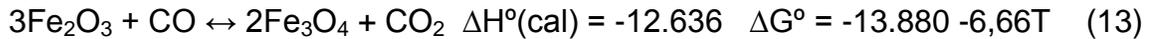


Figura 17 - Diagrama de Chaudron (ferro - oxigênio - carbono).

Fonte: Adaptado de Lucio, 1981.

Por outro lado, o grau de redução dos óxidos de ferro está relacionado à quantidade de oxigênio removido da sua estrutura, levando à uma diminuição do grau de oxidação inicial (ARAÚJO, 1997). Havendo remoção de todo o oxigênio contido nos óxidos, diz-se que o metal está completamente reduzido, e se encontra na sua forma metálica Fe<sup>0</sup>, conforme descrito pela equação (12).

A sequência de reações de redução, entalpia e energia livre associadas, típicas no processamento de altos-fornos para produção de ferro-gusa, estão representadas pelas equações (13), (14) e (15).



Basicamente, a condição de equilíbrio existente nas reações entre óxidos de ferro e seus redutores definirá o sentido através do qual uma reação irá se desenvolver. Os agentes redutores mais empregados na redução dos óxidos de ferro são o monóxido de carbono e o hidrogênio, ou até mesmo misturas de ambos. No entanto, a análise termodinâmica somente demonstrará qual reação está mais propensa a evoluir, conforme estado de energia livre associado à mesma, contudo, não determinará com que velocidade ocorrerão. Neste momento, a questão fundamental se volta para a cinética envolvida no processo, e a interpretação das leis que regem estas reações. Dessa forma, as análises termodinâmica e cinética, quando sobrepostas, permitem concluir quais reações se desenvolverão e as taxas envolvidas nos desdobramentos.

Durante o processamento do aço líquido em fornos elétricos a arco, pode-se dividir as etapas da corrida basicamente em carregamento, fusão, refino oxidante e vazamento. Em determinado momento, aproximando-se da etapa final da corrida, tem-se a fase chamada de refino redutor, onde ocorre uma tentativa de reduzir os óxidos de ferro formados ao longo da etapa de fusão. Estas reações são provocadas a partir da prática de obtenção de escória espumante na etapa do refino, que tem como um dos objetivos a recuperação do teor de ferro contido nos óxidos que formam a escória. Através da injeção de finos de carvão diretamente no seio da escória, desencadeiam-se uma série de reações, sobretudo a formação intensa de gases CO e CO<sub>2</sub>, que provocam um efeito de espumação, cobrindo o arco elétrico e aumentando a eficiência energética do processo. Este é um importante mecanismo para elevar o rendimento energético e metálico do reator, contribuindo como um diferencial competitivo quando executado de forma assertiva.

Os aspectos relevantes que direcionam as reações que promovem o retorno do ferro metálico da escória para o banho líquido foram comprovados em testes laboratoriais (STORY, 1998), e creditam a eficiência da recuperação à seguinte sequência de eventos:

- (1) difusão de grandes quantidades de FeO para a interface da escória/gás;
- (2) reação química na interface gás/escória;
- (3) difusão de CO<sub>2</sub> da interface gás/escória para a interface gás/carbono e;
- (4) reação química na interface gás/carbono.

A temperatura também é um parâmetro na análise da redução dos óxidos de ferro de alta relevância. Esta afirmativa advém da análise dos resultados apresentados pela maioria dos autores pesquisados, que relatam que o aumento da temperatura acelera a velocidade de redução do óxido de ferro (REIS, 2008). Grande parte dos autores citados realizaram seus experimentos até a temperatura máxima de 1423°C e também descreveram que a redução do óxido de ferro pelo carbono é fortemente endotérmica.

Estudos focados no entendimento dos fenômenos envolvidos no processo de formação e crescimento das carepas têm sido desenvolvidos, pois deve-se considerar que a oxidação do aço durante o processo de aquecimento é uma fonte de perda de massa substancial. Dessa forma, menores custos de produção podem ser alcançados fundamentalmente pela redução da perda de massa do material durante o aquecimento, ou seja, através da melhoria do rendimento metálico do aço no seu processamento. Obviamente, o conteúdo de ferro presente na composição da carepa desperta o interesse na indústria siderúrgica, pois representa um ganho econômico potencial para a empresa caso a rota de reciclagem adotada logre êxito. A recuperação do teor metálico do ferro pode representar a substituição do emprego de minério de ferro e sucatas ferrosas no processamento do aço, mesmo que em pequenas proporções e, com isso, reduz-se o emprego de matérias-primas e o custo associado (TAKANO, 2000). Os ganhos, sem dúvida, podem ser estendidos para âmbito ambiental, pois retornando para o consumo, a carepa deixa de gerar custos com

estocagem, já que para serem armazenadas, elas necessitam de condições específicas que são estabelecidas pelos órgãos ambientais competentes. O correto cumprimento das instruções e procedimentos relativos ao gerenciamento deste resíduo permitirá que a empresa tenha resultados ambientais adequados e o completo atendimento às leis e normas ambientais vigentes.

### **3.5.3 O PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA**

O pó de aciaria é um resíduo sólido de indústrias siderúrgicas gerado como particulado nas emissões provenientes da fabricação do aço em fornos elétricos a arco, os quais tem na sucata sua matéria-prima base para a produção do aço. Contudo o pó de aciaria também é gerado em aciarias a oxigênio que operam com conversores. O PAE, como é denominado o pó de aciaria elétrica, é composto por diferentes óxidos metálicos, destacando-se o Zn, Cr, Pb e Cd, e devido às concentrações de Pb e Cd normalmente ultrapassarem às faixas admitidas pela NBR 10004(1987), o PAE é classificado como resíduo perigoso Classe I (VARGAS, 2002).

Durante o refino oxidante do FEA, onde se tem o maior volume de oxigênio injetado em uma corrida, é possível observar a formação de uma fumaça densa e avermelhada. Esta fumaça é composta por um pó fino, o qual é proveniente dos elementos volatizados diretamente do banho, juntamente com finos de cal e carbono adicionados à corrida. O agente transportador dos elementos volatizados é o CO, e o PAE, juntamente com os gases formados, é captado por um sistema de exaustão acoplado ao forno, sendo removido por um sistema de despoeiramento até sua disposição em silos. Posteriormente são transportados para depósitos apropriados.

Três categorias de processos para o PAE são apontados por Donald et al. (1996):

- a) estabilização do pó sem recuperação dos metais, ou seja, disposição em aterros para resíduos perigosos, sendo esta a opção menos desejável por gerar custos;
- b) estabilização do pó pela combinação com outros materiais;
- c) e método de tratamento para recuperação dos metais enquanto ocorre a estabilização do resíduo.

Conceitualmente a estabilização refere-se à técnica que reduz o potencial perigoso de resíduos pela conversão dos contaminantes em uma forma menos tóxica, menos solúvel e menos móvel. As características do estado físico e de manuseio com resíduos não são necessariamente modificadas pela estabilização. Como exemplo deste método, o PAE pode ser adicionado em blocos de concreto, bem como em pastas de cimento. Estes materiais podem agir como formador de uma matriz para encapsular os metais pesados contidos no pó promovendo assim sua estabilização. Isto pode fazer com que os blocos, contendo o resíduo Classe I em sua composição, através do encapsulamento em matriz cimentante se transforme em um produto Classe II, portanto, não-inerte.

O tratamento pirometalúrgico é outra alternativa largamente utilizada. A mais comum é via forno Waelz, onde é produzido um óxido de Zn contendo entre 55 e 60% de zinco (STUART, 1999). Este por sua vez pode ser transformado em um produto com valor de mercado como placas de zinco, ou óxidos de zinco com grau de pureza para outras aplicações industriais.

### **3.6 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS EM USINAS INTEGRADAS A ALTOS-FORNOS A COQUE**

A reciclagem da carepa na própria planta é um fator essencial, pois as usinas integradas a coque contam com reatores para redução do minério de ferro, e fica pressuposto que existe maior compatibilidade entre a composição química do resíduo e a carga utilizada no processo. Além disso, elimina-se a necessidade de transporte para longas distâncias e agregam-se os benefícios financeiros associados à recuperação do teor ferroso contido na carepa.

A alternativa mais comum na reciclagem de carepa é sua adição na mistura a ser sinterizada em unidades de sinterização. Contudo, sinter produzido à base minério de ferro hematítico e, portanto, de alta redutibilidade, acaba sendo fortemente impactado na sua qualidade e produtividade quando reduzido no alto-forno, pela elevação no teor de FeO. Por esta razão a quantidade de carepa adicionada à mistura do sinter é bastante limitada, e o processo de sinterização não é rota definitiva de reciclagem, pois

é capaz de absorver apenas uma pequena parcela da carepa gerada. Esta limitação fomenta o estudo de outras rotas para a reciclagem da carepa.

Na tentativa de recuperar o valor metálico do ferro contido na carepa, produziram-se pelotas a partir da mistura com óleo, lama de alcatrão de coqueria como ligante e fonte adicional de carbono. Estas pelotas foram introduzidas em um forno de cuba e reator de leito fluidizado em diferentes temperaturas. O intuito final foi determinar se a redução da magnetita a ferro poderia ser obtida pelo carbono contido na mistura, porém a metalização da magnetita foi apenas parcial. Em temperaturas muito elevadas, o grau de redução foi menor, uma vez que ocorreu fusão incipiente do material e a coesão do material acabou por bloquear as reações (DEAN, 1973).

A reciclagem da carepa através da sua introdução em forma de briquetes em conversores também é uma alternativa importante. O briquete oferece vantagens de manuseio do material e também de poder incorporar na sua composição, além da carepa, outros resíduos como pós e lamas. O grande desafio deste método é estabelecer a combinação ótima do percentual de cada resíduo na composição do briquete de forma a obter o melhor desempenho sem prejudicar o processo de refino do aço (BALAJEE, 1995). Existem usinas que conduzem o consumo da carepa através deste método de forma rotineira, no entanto, agrega-se, neste caso, o custo operacional da briquetagem ao processo.

### **3.7 PROCESSOS ALTERNATIVOS DE RECICLAGEM - AUTORREDUÇÃO**

Muitos dos resíduos gerados atualmente são de difícil, às vezes, de impossível reutilização pelos processos convencionais. As limitações de reciclagem de tais materiais, pelos processos convencionais, ocorrem principalmente por razões econômicas, devido ao baixo valor intrínseco dos materiais recicláveis, ou por razões de ordem técnica, tais como contaminação, granulometria ou periculosidade. Por outro lado, estudos desenvolvidos nos últimos anos visando um entendimento pleno dos mecanismos que regem a reação de Boudouard, tem como um dos objetivos alavancar processos emergentes, sobretudo na linha da reciclagem. Os principais fatores que afetam de maneira mais significativa a cinética da reação já foram identificados:

temperatura, características da atmosfera gasosa, tipo de material carbonoso (estrutura química, porosidade, etc.), condições de pré-aquecimento e condições experimentais. Os fenômenos relacionados ao equilíbrio termodinâmico estão evidenciados através do diagrama carbono – oxigênio da figura 18.

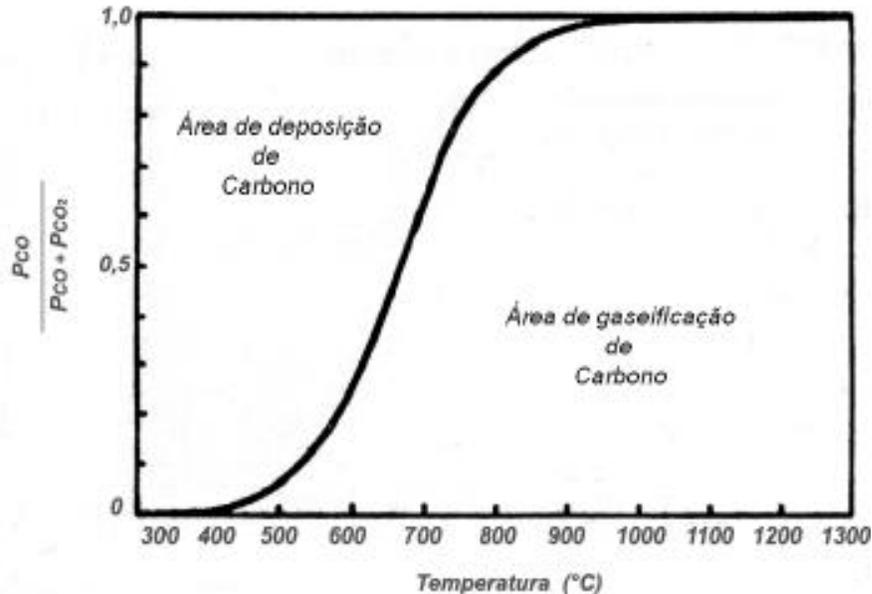


Figura 18 – Curva de Boudouard.

Fonte: Lúcio, 1980.

Entre estas novas tecnologias, a autorredução vem de encontro às necessidades da siderurgia moderna. Este processo baseado na utilização de aglomerados autorredutores, onde o agente redutor, o carbono, é adicionado diretamente à mistura de óxidos a ser aglomerada. O amálgama formado entre as partículas juntamente com alta pressão parcial dos reagentes promovem altas velocidades de reação e, por conseqüência, menores tempos de residência dos aglomerados nos fornos. Dessa forma, a tecnologia da autorredução vem sendo utilizada para recuperação de finos de minérios, finos de coque e reaproveitamento de diversos resíduos siderúrgicos, entre eles a carepa. A figura 20 ilustra de forma representativa um aglomerado autorredutor.

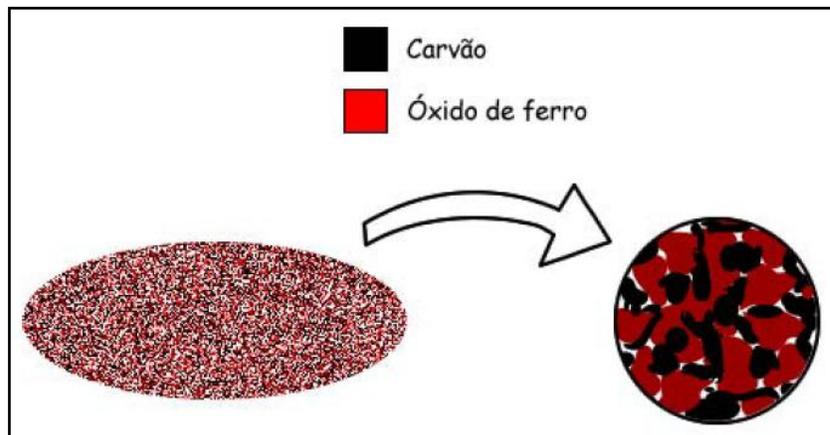
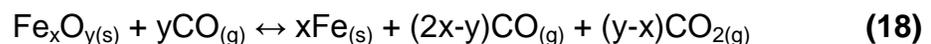
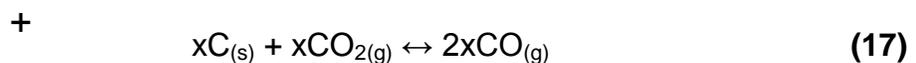


Figura 19 - Representação esquemática de um aglomerado autorredutor.

Fonte: Buzin, 2009.

Flores (2011) descreveu que a redução carbotérmica dos óxidos de ferro presentes em misturas autorredutoras pode ser genericamente expressa como na equação (16), onde a redução dos óxidos de ferro ocorre através do gás CO, o qual é produto da reação de Boudouard, visto na figura 18 anteriormente, e pode ser representada pela equação (17). A reação sólido/sólido, ou seja, carbono e óxido de ferro sólidos é muito lenta quando comparado com a reação gás/sólido, logo é determinante que a reação global ocorra por agentes gasosos. O principal mecanismo de geração do gás redutor CO é reação do dióxido de carbono, este como produto das reações de redução com o carbono presente no agente redutor da mistura. Desta forma, verifica-se total interdependência das reações de redução e formação de gás redutor. Portanto, a reação global de redução dos óxidos de ferro por CO fica representada na equação (18), sendo esta uma adição da reação de Boudouard com as demais reações de redução.



Noldin (2002) enumera didaticamente a sequência de etapas envolvidas no processo da autorredução, como pode ser visto na figura 20::

- (1) Transporte de CO através dos microporos da camada de Fe metálico;
- (2) Adsorção de CO pelo óxido;
- (3) Reação química de redução;
- (4) Dessorção de  $\text{CO}_2$  da superfície do óxido;
- (5) Transporte de  $\text{CO}_2$  através dos microporos da camada de Fe metálico;
- (6) Transporte de  $\text{CO}_2$  pelo gás nos poros da mistura;
- (7) Adsorção de  $\text{CO}_2$  pelo C;
- (8) Reação de Boudouard;
- (9) Dessorção de CO da superfície do C;
- (10) Transporte de CO pelo gás nos poros da mistura;
- (11) Redução direta sólido/sólido.

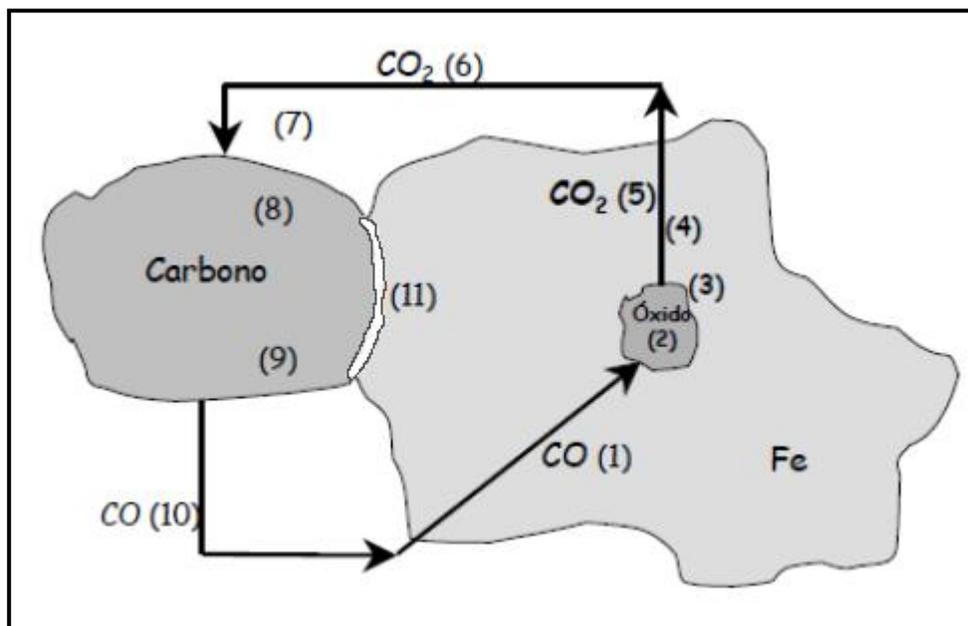


Figura 20 - Etapas envolvidas na redução de um aglomerado autorredutor.

Fonte: Noldin, 2002.

Alguns destes processos já se encontram em estágio comercial, porém, por se tratar de tecnologias relativamente novas, a bibliografia específica disponível é limitada. De qualquer maneira, esta escassez de informações é compensada pelo fato de não haverem reações ou mecanismos desconhecidos em tais processos.

O processo TecnoRed é uma tecnologia inovadora, concebida para a produção de ferro-primário líquido através da redução de aglomerados auto-redutores (pelotas ou briquetes) de cura a frio, produzidos a partir de finos de minérios de ferro ou resíduos ferrosos, mais um agente redutor como finos de coque verde de petróleo, carvão vegetal ou carvão mineral. Estes materiais, misturados com fluxantes e ligantes, são aglomerados e curados ao tempo ou em equipamentos de concepção especial. Os aglomerados produzidos são então reduzidos e fundidos em um forno de cuba com geometria diferenciada, o forno TecnoRed, mostrado de forma esquemática na figura 21 que, por suas características únicas, permite o uso variado de combustíveis sólidos de baixo custo, como coque verde de petróleo, coque, carvão mineral ou semi-coque, produzindo metal líquido e escória com características similares aos produzidos pelos processos convencionais.

O forno TecnoRed foi dimensionado a partir de módulos básicos, o que permite que o forno seja construído de maneira escalonada, de acordo com as pretensões das empresas ou até mesmo obedecendo às demandas de mercado. Outro aspecto importante é a sua flexibilidade, pois a partir da utilização do mesmo forno, o processo também pode ser utilizado para a simples fusão de carga metálica, como sucatas, ferro gusa e cavacos de usinagem, com custo de fusão menor que os processos convencionais, fornecendo metal líquido para aciarias ou fundições, contribuindo para a solução de eventuais problemas de desbalanceamento de produção, reduzindo o consumo de energia elétrica e aumentando a produtividade das usinas.

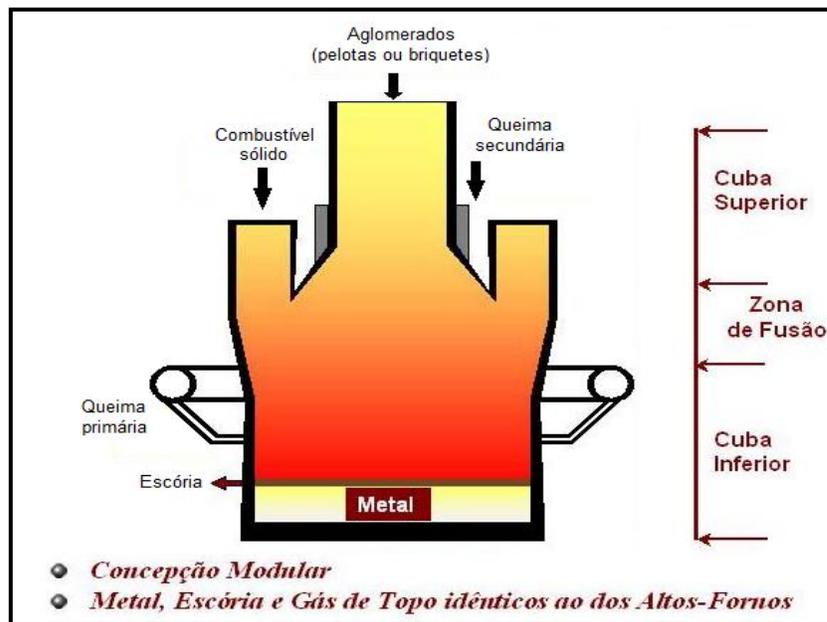


Figura 21 – Forno TecnoRed em detalhes esquemáticos.

Fonte: Noldin, 2002.

Desenvolvido no Brasil, tem se destacado no cenário da reciclagem, pois foca o processamento de resíduos siderúrgicos, incluindo a carepa, para obtenção de ferro. Fundamentalmente, apresenta a possibilidade de utilização de aglomerados auto-redutores para processamento em um forno de redução-fusão. A rota é considerada promissora, uma vez que promove ganhos ambientais e econômicos pela produção de ferro-gusa de boa qualidade e baixo consumo de combustível (NOLDIN, 2002).

### 3.8 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS EM USINAS MINI MILLS SEMI-INTEGRADAS

A reciclagem de carepa em usinas semi-integradas segue praticamente a mesma tendência de recuperação do teor metálico da sua composição. Normalmente dotadas de um forno elétrico a arco (FEA), operam com gusa e sucatas metálicas em fornos acelerados, com pouco tempo para evolução das reações de interesse para emprego de matérias-primas alternativas. No entanto, ao considerar que a geração de carepa nestas usinas não é um volume desprezível, uma série de estudos tem sido

desenvolvidos para fundamentar soluções viáveis de forma a eliminar passivos ambientais.

Avaliação da potencialidade de reciclagem da carepa sob a forma de briquetes autorredutores para introdução no próprio processo de fabricação do aço via forno elétrico a arco foi proposto em estudos recentes (NETO, 2009) e (BUZIN, 2009). Nos ensaios de redução, um lote de briquetes feito com a carepa bruta e outro lote de briquetes confeccionado com a carepa triturada tiveram desempenho semelhante em temperaturas acima de 1200°C. Os briquetes confeccionados com a carepa bruta apresentaram uma melhor taxa de redução em temperaturas na faixa dos 1100°C. Por meio de simulação termodinâmica e cálculos de balanço térmico, verificou-se que o briquete consome uma quantidade maior de energia para produzir uma mesma massa de liga metálica fundida, na razão teórica de aproximadamente 4,5 vezes. Da mesma forma, concluiu-se teoricamente que caso seja possível o aproveitamento da energia térmica da combustão do monóxido de carbono proveniente das reações de redução e do carbono excedente, esta diferença energética pode ser diminuída. Uma análise global dos resultados permite concluir pela potencialidade do uso no FEA de briquetes autorredutores fabricados com carepas e finos de carvão vegetal como componentes principais, no entanto, os experimentos necessitam de validação prática em escala industrial.

Outro estudo baseado em testes na planta industrial realizou a utilização de carepa como matéria-prima ferrosa em briquetes autorredutores para uso em FEA. O autor cita que os testes realizados com carregamentos de 15 a 20% de briquetes em um forno de 25 toneladas não apontaram variações significativas nos parâmetros de processo (GODINSKII, 2003). Entretanto, é necessário considerar a possibilidade da adição de quantidades adicionais de oxigênio por ocasião da fusão da carga de modo a se obter o melhor rendimento energético do carbono adicional existente na formulação do briquete e completar a queima do monóxido de carbono gerado pelas reações de redução. Outro aspecto importante é que a estimativa do real consumo energético dos briquetes, quando comparada à carga normal do FEA, pode apresentar dificuldades práticas de aferição (BUZIN, 2009). Estas dificuldades estão relacionadas com o ambiente termodinâmico onde as reações ocorrem, o que pode variar não só de um

equipamento a outro, mas também em função das condições de utilização dos briquetes no forno. O pleno aproveitamento energético dos voláteis desprendidos pelo carvão vegetal e do excesso de carbono introduzido na composição do briquete dependem destes fatores operacionais. Por outro lado o briquete é um compósito, cujos componentes reagem entre si produzindo liga metálica, escória e gases, onde várias reações químicas e transformações físicas ocorrem, cada qual colaborando positiva ou negativamente para o balanço energético global da autorredução, dificultando a exata avaliação teórica da influência de cada um destes fenômenos.

Outra linha de pesquisa em usinas semi-integradas para introduzir resíduos siderúrgicos no FEA evoluiu no sentido da tecnologia de injeção direto no banho líquido. Ficou comprovado, através de testes em FEA, que é possível obter uma economia no consumo de energia elétrica, redução de consumo de eletrodos e um tempo de corrida mais curto (DANILOV, 2003). Tais benefícios foram alcançados pela melhoria obtida na formação da escória espumante do forno através da injeção da carepa misturada com cal e pó de carvão.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto deste trabalho são carepas de uma usina siderúrgica semi-integrada, do tipo mini-mill, produtora de aços longos ao carbono. No que tange à caracterização, determinou-se estudar especificamente as carepas oriundas das laminações, por representarem a porção majoritária, correspondendo aproximadamente a 69% da geração total, assim como também uma mistura de todas as carepas produzidas na usina. As carepas das laminações foram assim identificadas, L1 – laminador 1 e L2 – laminador 2. Estas laminações são produtoras de fio-máquina, vergalhões em rolo, barras, perfis e vergalhões retos, em média produzem 40.000 toneladas por mês em conjunto.

A carepa misturada foi identificada simplesmente pela sigla CM. De acordo com gráfico da figura 22, pode-se verificar a geração média de carepa no lingotamento contínuo (LC), que representa 4% do total gerado, nas laminações, conforme já apontado, 69% do volume total, sendo o restante gerado nas unidades trefiladoras entre outros.

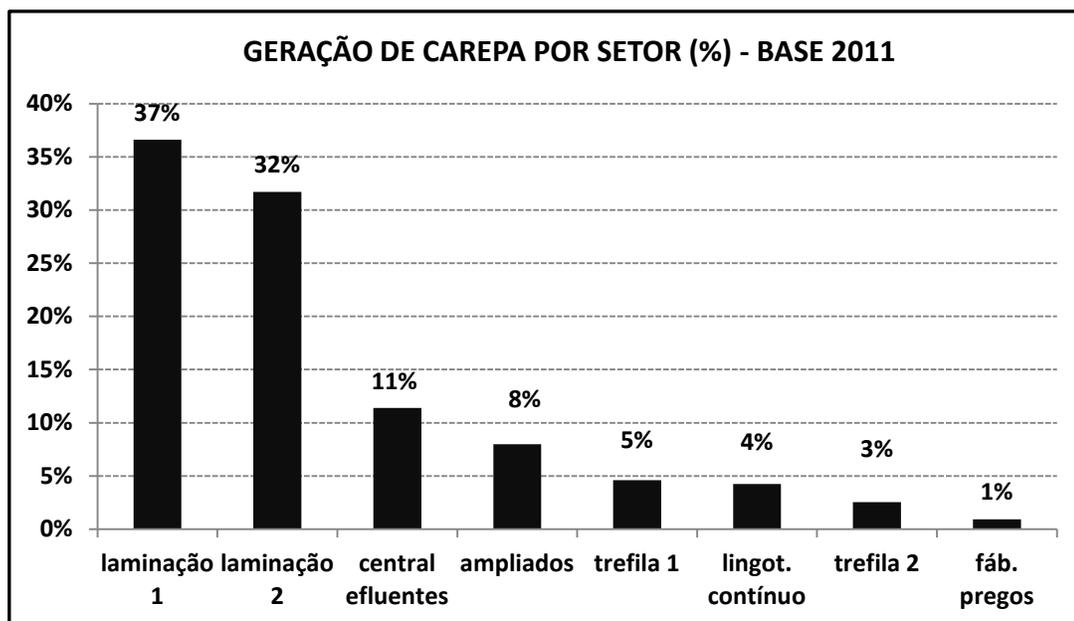


Figura 22 - Geração média de carepa, destacando setores de interesse para caracterização denominados laminação 1 e 2.

Fonte: Gerdau, 2012.

Atualmente, o destino da carepa é ser adicionada como co-produto, na mistura dos componentes para fabricação de cimento, em uma usina cimenteira distante 430 km do local gerador. Para permitir aplicação como co-produto na fabricação do cimento, a carepa ainda deve ser peneirada para segregação de materiais metálicos e não metálicos, os quais são considerados contaminantes e, portanto, deletérios ao processo de produção do cimento. Dessa forma, agrega-se um custo de beneficiamento e um custo de transporte para usina geradora promover a reciclagem da sua carepa. Evidentemente, a etapa de caracterização poderá suportar as possíveis propostas de reciclagem dentro da planta geradora, de forma a reverter o ônus atual.

#### **4.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS**

À medida que os passes de laminação a quente evoluem, ocorre a formação contínua de carepa, a qual se desprende do substrato do material-base por meio do repetitivo esforço exercido durante a conformação do mesmo. Com isso, a carepa que se desprende ao longo do trem laminador é direcionada por meio de um sistema de dutos localizado sob o trem laminador, onde a água utilizada na refrigeração dos elementos mecânicos da máquina fazem o seu transporte. Este fluxo conduz a carepa até um tanque de acumulação, onde a mesma é coletada periodicamente com o auxílio de uma ponte rolante equipada com uma caçamba, conforme ilustrado na figura 23.

Posteriormente, a carepa é transportada para ser estocada em um galpão coberto, dotado de um sistema de drenagem (figura 15), a fim de eliminar o excesso de água carregada juntamente com a carepa.



Figura 23 - Recolhimento da carepa do poço de acumulação.

Fonte: Lopes, 2011.

A carepa do início do processo de laminação apresenta-se sob forma de plaquetas grosseiras, diferentemente da carepa formada nas etapas finais de laminação, que têm distribuição granulométrica menor e, por isso, tende a adsorver mais água. A figura 24 demonstra a diferenciação entre as morfologias das carepas.

O procedimento de amostragem seguiu o procedimento estabelecido por Lopes (2011) e buscou englobar as diferentes morfologias de carepas encontradas nas laminações: carepa de granulometria fina e grossa das unidades denominadas L1 e L2. O plano amostral ocorreu durante o período de 2 semanas em 5 dias diferentes. Em cada coleta, houve extração de aproximadamente 2 kg de material, perfazendo um total de 10 kg de amostra, por tipo de carepa coletada, conforme ilustrado na figura 25. Ao longo de 25 dias, os operadores responsáveis pelo recolhimento de carepa preencheram uma tabela com intuito de quantificar a proporção entre carepa fina e grossa gerada em cada laminação. Nesta tabela, ficou registrada a quantidade de garras coletadas de cada morfologia, considerando o turno de trabalho e, pelo volume de cada garra de 1,60m<sup>3</sup>, foi possível estimar a proporção da carepa gerada em cada morfologia. No Laboratório de Siderurgia (LASID) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a carepa foi preparada, conforme o procedimento da norma NBR 10.007 (ABNT, 2004), para as análises de caracterização do resíduo.



Figura 24 - Aspecto morfológico da carepa de plaquetas grosseiras e a parte mais fina.

Fonte: Lopes, 2011.



Figura 25 - Ilustração do procedimento de coleta de amostras de carepas.

Fonte: Lopes, 2011.

A amostra de carepa misturada - CM - foi coletada após processo de beneficiamento feito por empresa terceirizada. Conforme já mencionado, a carepa atualmente é destinada para empresa cimenteira, a qual exige um beneficiamento por um processo de peneiramento contínuo, para remoção de impurezas deletérias à elaboração do cimento, exemplificado pela figura 26. Este processo acaba por produzir uma pilha de carepa homogeneizada de toda usina siderúrgica.



Figura 26 - Peneiramento contínuo para beneficiamento da carepa.

Fonte: Gerdau, 2012.

## **4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS CAREPAS**

As amostras de carepas inicialmente foram homogeneizadas e cominuídas a uma granulometria menor que 0,074mm, em moinho de bolas de laboratório. Alíquotas foram separadas para sequência dos ensaios de caracterização. Amostras de “carepas brutas” foram submetidas à análise granulométrica. A metodologia de caracterização foi conduzida conforme modelos propostos em diversos trabalhos Lopes (2011), Cunha (2006), Buzin (2009) e Bagatini (2011).

### **4.2.1 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE E ÓLEO**

Uma das questões fundamentais para introdução da carepa no forno elétrico a arco é justamente definir se acarretará um aumento no consumo energético do processo. Evidentemente, um maior aporte de energia será necessário quanto maior for o teor de umidade presente no material a ser reciclado. Sendo assim, a determinação dos teores de água e óleo se torna imprescindível, e estas análises foram realizadas paralelamente ao processo de preparo das amostras. Basicamente, o teor de umidade foi estabelecido pelo aquecimento em estufa, a uma temperatura de 105°C durante 24

horas. A massa amostral foi pesada antes da secagem e também ao final do período, de forma que diferença de peso revela o teor umidade. Para determinação do teor de óleo, após a secagem, as carepas foram submetidas a um aquecimento de 305 °C durante o período de 1 hora. Comparando-se a diferença de massa, determinou-se o teor de óleo das carepas. Para essas análises foi utilizada uma estufa para secagem e esterilização do fabricante DeLeo, no Laboratório de Siderurgia da UFRGS.

#### 4.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O conhecimento do perfil granulométrico da carepa fornecerá dados que auxiliarão no planejamento da rota de reciclagem. Na prática, servirá para determinar proporções de misturas com finos de carvões, coque ou outros resíduos a serem reciclados em processos como de pelotização ou briquetagem, por exemplo. Amostras passaram por um processo de peneiramento, em peneiras redondas marca Bertel e agitador de peneiras do fabricante Bronzinox, Modelo ABMA 0800, no Laboratório de Siderurgia da UFRGS. Aproximadamente 1000g de cada uma das “carepas brutas”, já previamente secas e quarteadas, foram classificadas em peneiras de diferentes malhas, conforme a especificação da tabela 5.

Tabela 5 – Especificação das peneiras utilizadas no ensaio granulométrico das carepas.

Fonte: Lopes, 2011.

Escala (mesh)	Abertura (mm)
4	4,75
7	2,37
14	1,41
20	0,84
28	0,59
35	0,42
48	0,297
100	0,149
150	0,105
200	0,074
270	0,053

#### **4.2.3 ANÁLISE QUÍMICA DO FERRO POR VIA ÚMIDA**

Sendo o ferro o elemento presente na carepa de maior interesse, é fundamental que se conheça seu teor e a forma como se apresenta. Foram realizados os ensaios por via úmida para quantificar os teores de ferro total e ferro metálico ( $\text{Fe}^0$ ) presentes nas amostras. Para isso, foram utilizadas duas parcelas de 10g para execução das análises, as quais foram homogeneizadas e quarteadas após a moagem a uma granulometria abaixo de 0,074mm. As análises foram realizadas no laboratório LEAMET, localizado no Centro de Tecnologia da UFRGS.

#### **4.2.4 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)**

Sendo a carepa uma composição de óxidos, a utilização dessa técnica teve como objetivo identificar qualitativamente as principais fases cristalinas presentes acima de 5% no material, podendo ocorrer algumas variações de acordo com a cristalinidade da fase. Os ensaios foram realizados no Instituto de Geociências da UFRGS, em um difratômetro de marca SIEMENS, modelo D5000, ano 1992, com goniômetro  $\theta$ - $\theta$ . A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro utilizados são de 1 segundo para  $0,02^\circ$  de degrau, de  $2^\circ$  a  $72^\circ 2\theta$  respectivamente.

#### **4.2.5 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER (EM)**

A técnica de espectroscopia Mössbauer, ou ressonância nuclear gama, é considerada de grande precisão para análise dos compostos associados ao ferro. Foi utilizado para determinação das fases óxidas ferrosas e do ferro metálico presentes nas amostras de carepa. Em comparação à difratometria de raios-X, a espectroscopia Mössbauer pode detectar, seletivamente, quantidades menores de compostos (~1%) e ainda fornecer resultados quantitativos a respeito das fases presentes. Sendo assim, a

partir do detalhamento da composição de fases óxidas que compõem a carepa, será possível, por exemplo, estabelecer a relação estequiométrica com o agente redutor para ensaios de redutibilidade. Também será possível estabelecer de forma teórica a energia associada às reações de redução necessária para conduzir o ferro à sua forma metálica, favorecendo o rendimento metálico do processo.

Na realização deste ensaio, foi usado um espectrômetro Mössbauer de aceleração constante com fonte de  $^{57}\text{Co}$ , numa matriz de Rh e um contador proporcional Kr ( $\text{CO}_2$ ) como detector, presente nas instalações do Instituto de Física da UFRGS.

### 4.3 TESTES DE REDUÇÃO EM FORNO MUFLA

Com intuito de avaliar o potencial de redutibilidade da carepa, e com isso subsidiar seu processo de reciclagem em forno elétrico a arco, testes de autorredução e redução-fusão foram realizados no LASID, no Centro de Tecnologia da UFRGS. Para isso, uma composição de carepa e agente redutor no estado sólido foi submetida ao aquecimento em diversas condições experimentais. Através destes ensaios, buscou-se, fundamentalmente, o entendimento de como a elevação da temperatura, tempo de reação e disposição dos constituintes interferem na redutibilidade das misturas e na metalização dos produtos formados após as reações. A eficiência dos ensaios foi avaliada a partir da perda de massa das amostras e da metalização do produto ao final do experimento. Os dados de variação de massa são de mais fácil interpretação a partir do cálculo da fração reagida (F), obtido através da seguinte equação (19), onde  $m_0$  é a máxima perda de massa (voláteis+carbono+oxigênio) e  $m(t)$  a perda de massa da amostra no tempo t.

$$F(t) = \frac{m_0 - m(t)}{m_0} \quad (19)$$

### 4.3.1 ELABORAÇÃO DA MISTURA

Em seus estudos, Flores (2011) mostra em detalhes a metodologia determinística para elaboração de misturas autorredutoras. Em linhas mais abrangentes, a proporção estabelecida entre a carepa e agente redutor foi determinada visando à total remoção do oxigênio contido na carepa. Por conveniência, o redutor selecionado para a mistura foi aquele que já é utilizado para injeção no forno elétrico a arco. Denominado comercialmente como Unicarbo20, é constituído de coque de petróleo aqui ilustrado na figura 27 juntamente com as características de distribuição granulométrica e análise imediata.

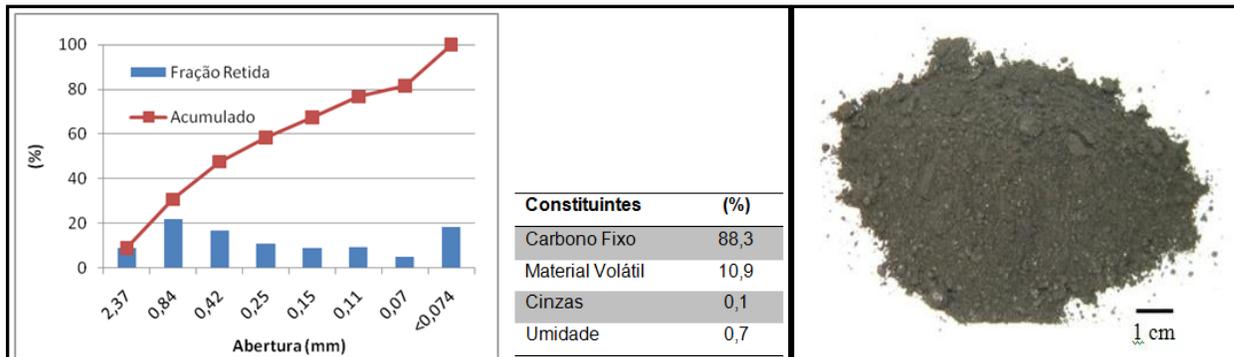


Figura 27 - Distribuição granulométrica (esquerda), análise imediata (centro) e aspecto morfológico do Unicarbo20 (direita).

Fonte: Flores, 2011.

Através da avaliação da quantidade de oxigênio contido na carepa e do carbono fixo contido no redutor, foi estabelecida uma razão molar C/O próxima de 1 para amostra autorredutora. A proporção de cada constituinte foi determinada com base no teor de oxigênio redutível contido na carepa (relação percentual entre a massa atômica do oxigênio sobre os respectivos óxidos que compõem a carepa) e de carbono fixo do agente redutor. Neste ponto, torna-se necessário considerar que a carepa é constituída principalmente de wustita, e que a reação global de maior interesse nesse estudo para autorredução da mistura é a reação que ocorre via intermediários gasosos apontada na equação (10), a qual fora descrita anteriormente. Esta reação aponta para uma razão

molar C/O igual a 0,85 ao passo que a relação mássica é de 0,75, considerando as massas atômicas para carbono e oxigênio como 12 e 16, respectivamente. Visto que o percentual de oxigênio redutível associado ao ferro contido na carepa é de aproximadamente 25%, o percentual de redutor adicionado a mistura foi de 15%, considerando uma relação molar próxima de 1. A constituição química da mistura, estimada a partir da composição química dos constituintes, é mostrada na tabela 6.

Tabela 6 - Composições da carepa, redutor e da mistura autorredutora.

	Fe	O	C fixo	Voláteis	Ganga	C/O molar	% massa
<b>Carepa</b>	71,4	25,0	-	-	3,6	-	85,0
<b>Redutor</b>	-	-	88,3	10,9	0,8	-	15,0
<b>Mistura</b>	60,1	21,2	13,5	1,2	3,1	0,85	-

Determinada a composição da mistura das massas de carepa e coque de petróleo, foram confeccionados “mini bags” contendo 50g de amostra, porém de duas formas distintas. O primeiro com os constituintes estratificados e o segundo com os constituintes homogeneamente misturados, como se observa na figura 28.

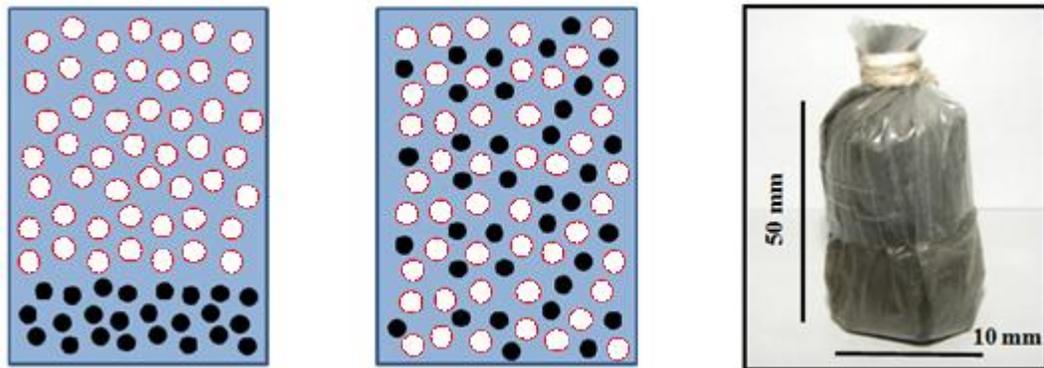


Figura 28 - Disposição das partículas de carepa (claras) e do material redutor (escuras) nos “mini bags” testados. Amostra estratificada (esquerda), misturada (centro) e “mini bag” pronto para ensaio.

Fonte: Adaptado de Flores, 2011.

### 4.3.2 ENSAIO DE AUTORREDUÇÃO EM FORNO MUFLA

Através de ensaios de autorredução, buscou-se conhecer o comportamento de redutibilidade da carepa em função da disposição dos constituintes (carepa e coque de petróleo), ou seja, com as amostras confeccionadas de forma estratificada e homoganeamente misturadas, conforme ilustrado anteriormente na figura 28. Os testes foram realizados em forno mufla resistivo da marca Jung modelo LF0916 mostrado na figura 29, com detalhe esquemático da parte interna da câmara de aquecimento e suas respectivas dimensões.

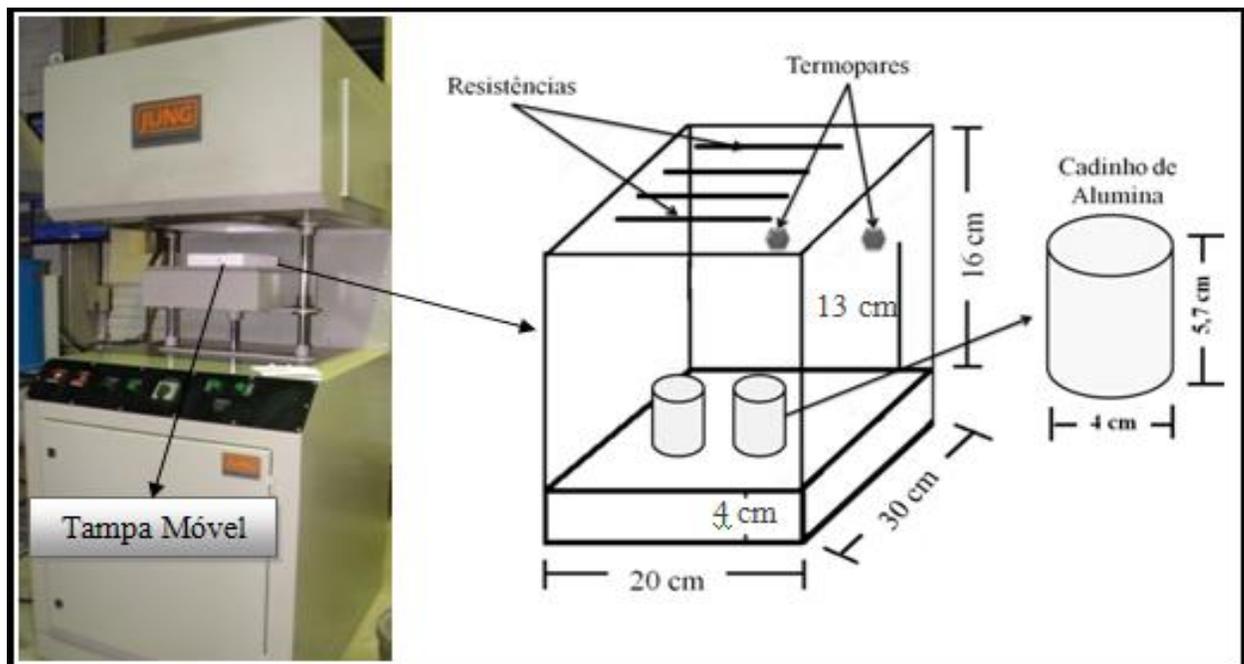


Figura 29 - Forno Mufla (esquerda) com detalhes esquemáticos (direita).

Fonte: Flores, 2011.

Os ensaios foram realizados nas isotermas de 1200 e 1300°C para as amostras estratificadas e nas temperaturas de 1000, 1100, 1200 e 1300°C para amostras homogêneas. Os tempos de permanência das amostras no interior do forno foram iguais a 5, 10 e 15min para todos os experimentos. Para realização de cada ensaio, o forno foi pré-aquecido e estabilizado na temperatura de teste, juntamente com o cadinho de alumina para homogeneização térmica do conjunto. Realiza-se, então, a

abertura do forno para introdução da amostra e, logo após o término do tempo previsto, o cadinho era retirado do forno e submetido a um resfriamento rápido em nitrogênio líquido, visando cessar as reações de autorredução e conseqüente reoxidação. A seqüência de etapas descritas acima para condução dos ensaios de autorredução é ilustrada na figura 30.

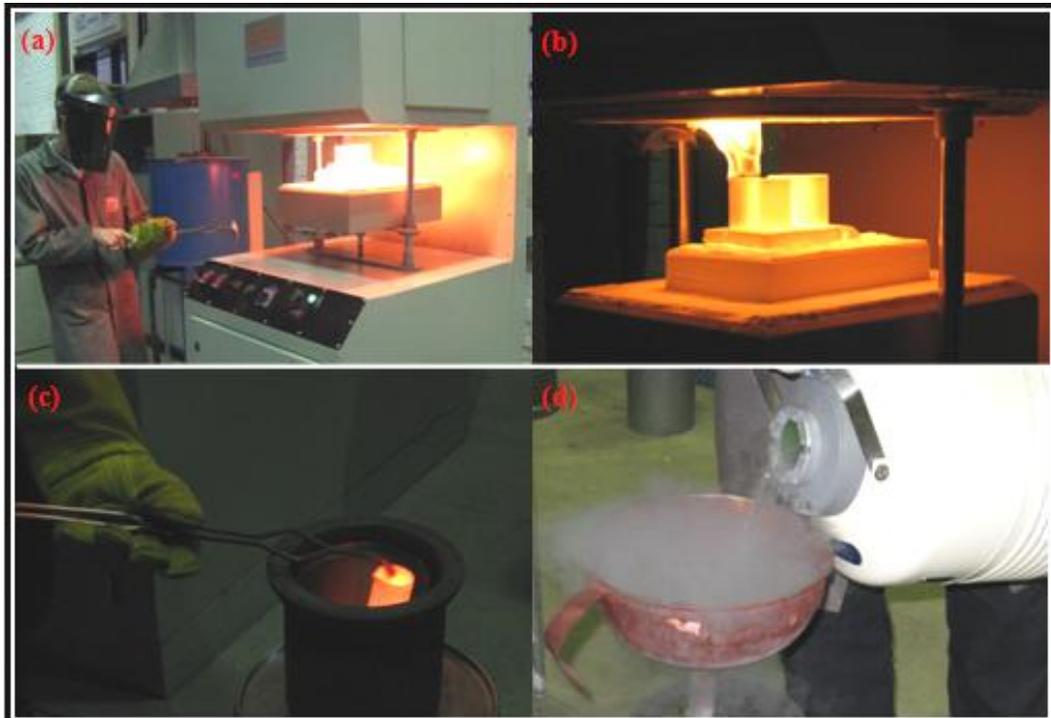


Figura 30 - Procedimento de ensaio em forno mufla, (a) abertura do forno e carregamento das amostras, (b) fechamento da tampa do forno, (c) retirada das amostras do forno e (d) resfriamento em nitrogênio líquido.

Fonte: Flores, 2011.

Além das medidas de variação de massa (antes e após o ensaio), as amostras remanescentes dos ensaios de autorredução foram submetidas a análise de via úmida para a identificação do ferro total e o ferro metálico. Esses dados permitiram calcular a metalização ( $M = \text{Fe}^{\circ}/\text{Fe total}$ ) atingida pelos diferentes tipos de amostras em diferentes condições de tempo e temperatura.

### 4.3.3 ENSAIO DE REDUÇÃO-FUSÃO EM FORNO MUFLA

Os ensaios de redução-fusão foram realizados para reproduzir em escala de laboratório as condições de tempo e temperatura de fusão aproximadas daquelas da operação do forno elétrico a arco. Para a realização de tais ensaios, utilizou-se somente amostras confeccionadas com os constituintes intimamente misturados. O forno foi pré-aquecido até 1500°C, aberto para o carregamento, e mantido sob o período de tempo previsto de 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 16 minutos. Ao final de cada período de ensaio, os cadinhos foram retirados para o resfriamento com nitrogênio líquido, conforme procedimento já descrito na figura 30. O ciclo térmico do forno nesses ensaios é mostrado no gráfico da figura 31.

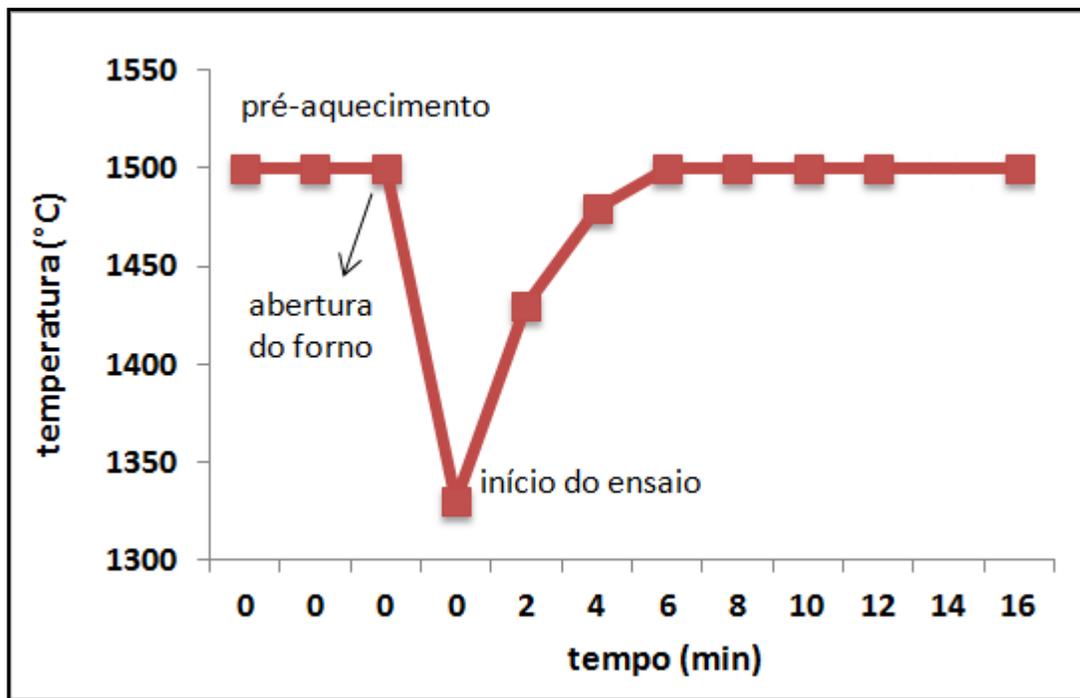


Figura 31- Ciclo térmico do forno com os tempos de retirada da amostra.

Fonte: Adaptado de Flores, 2011.

Nesses ensaios também foi avaliada a variação de massa e de metalização das amostras e, adicionalmente, se fez a análise morfológica para observar os fenômenos envolvidos na redução-fusão da mistura autorredutora.

#### 4.4 TESTES DE APLICAÇÃO DA CAREPA NO FORNO ELÉTRICO A ARCO

O forno elétrico a arco utilizado nos testes práticos tem capacidade para 25 toneladas de sucata, com volume bruto de aproximadamente 19m<sup>3</sup>, do fabricante BBC do ano de 1956 e transformador de 26MVA. A aplicação da carepa foi concebida para adição “*in natura*”, apenas coletada no local de estocagem central, onde seria possível eliminar o excesso de água trazida junto dos tanques de acumulação das laminações. Descartando o custo com beneficiamentos e processos de aglomeração e briquetagem, por exemplo, o único ônus associado nesta forma de utilização é o de prover a logística de movimentação interna da usina para manter o nível de emprego estabelecido. Já dentro da área de preparação de cestões, o manuseio da carepa foi facilitado, uma vez que o material conserva propriedades magnéticas, e pôde ser facilmente manuseado com ponte rolante equipada com eletroímã, conforme ilustrado na figura 32.



Figura 32 - Manuseio da carepa com eletroímã no pátio de preparação de cestões.

Fonte: Gerdau, 2012.

A quantidade estipulada para consumo foi fixada em 1% relativo à carga metálica normalmente carregada no forno. A validação desta quantidade, caso os resultados do emprego sejam satisfatórios, traz o benefício de reduzir a disposição externa em 56% do volume total de carepa gerada na planta. A carepa foi testada em duas condições de consumo de ferro gusa na carga, a 20 e a 25%, sendo que, para cada uma dessas condições, objetivou-se um mínimo de 25 corridas de teste com carepa. A base de comparação de resultados originou-se dos dados coletados, neste mesmo número de corridas, nas mesmas proporções de consumo de ferro gusa, porém, sem adição de carepa e, portanto, nas condições normais de operação. Os indicadores de processo analisados serão considerados como variáveis de monitoramento, de simples acompanhamento e, variáveis resposta, sendo aquelas em que se esperam alterações. As variáveis de monitoramento são injeção de oxigênio e injeção de coque. As variáveis resposta são composição do FeO da escória, rendimento metálico, consumo de energia elétrica e teor de P no aço.

A premissa fundamental para condução dos testes foi não produzir alterações nos parâmetros operacionais em função da aplicação da carepa na carga, ou seja, manter quantidades de injeção de oxigênio e do coque de petróleo, tempos de fusão e refino, qualidade da carga metálica entre muitos outros itens de operação. Preservando as condições normais de operação, será possível analisar quais os impactos reais da adição da carepa no forno e determinar os aspectos positivos ou negativos da sua reciclagem. Para isso, foi necessário estabelecer a qualidade do aço a ser testada. Através de uma verificação da grade de produção, buscou-se uma qualidade representativa, no caso um aço baixo carbono utilizado para fabricação de vergalhões (CA-60), o qual representa um dos maiores volumes de produção. Este fator também foi fundamental para facilitar a programação dos testes práticos. Para favorecer as reações de redução dos óxidos de ferro da carepa, esta foi adicionada no cestão no primeiro carregamento, entre as camadas de ferro-gusa, como mostra de forma esquemática a figura 33. O intuito fundamental foi de obter o efeito redutor do carbono associado ao ferro-gusa em contato íntimo com a carepa, à medida que tanto o ferro-gusa quanto a carepa fundiriam ao mesmo momento.

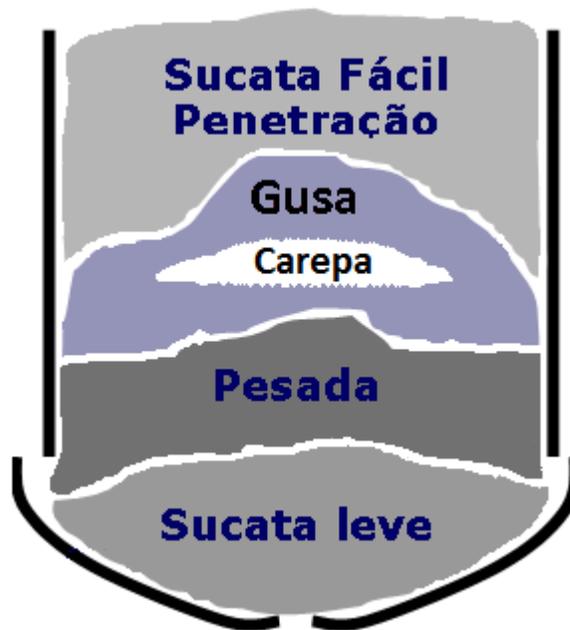


Figura 33 - Estratificação esquemática de um cestão, com carepa adicionada entre camadas de ferro gusa.

Fonte: Gerdau, 2012.

O local onde a carepa foi estocada dentro do pátio de preparação de cestões (PPC) possuía piso e cobertura. Não foram realizados testes em dias de chuva para não produzir resultados distorcidos que não pudessem ser comparados posteriormente.

O critério fundamental para análise dos efeitos da carepa no forno foi a comparação dos indicadores de processo, na mesma qualidade de aço, com e sem carepa adicionada. Foram coletados dados de produção no momento de cada corrida para avaliação dos indicadores de rendimento metálico, consumo de energia elétrica, consumo de oxigênio, coque injetado, teor de FeO na escória e teor de fósforo (P) no aço. Ao final de cada corrida de teste, foi coletada uma amostra de escória, ou seja, ao final do refino oxidante e instantes antes que ocorresse o vazamento do aço líquido a escória era coletada. Assim, garantiu-se uma amostragem de escória do último estágio da corrida. Neste momento, também foram retiradas amostras de aço para verificação do teor de fósforo. Após preparação específica, as amostras de escória foram analisadas em um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios-X, modelo ARL

Advanti'x+ do fabricante Thermo Electron. As amostras de aço foram analisadas em espectrômetro de emissão ótica modelo ARL3460 do fabricante Applied Research Laboratories utilizado para verificação das faixas de composição química “on line” durante a produção das corridas dentro da aciaria. A figura 34 a seguir exemplifica as amostras de aço e escória, retiradas com amostradores Ecil Met Tec.

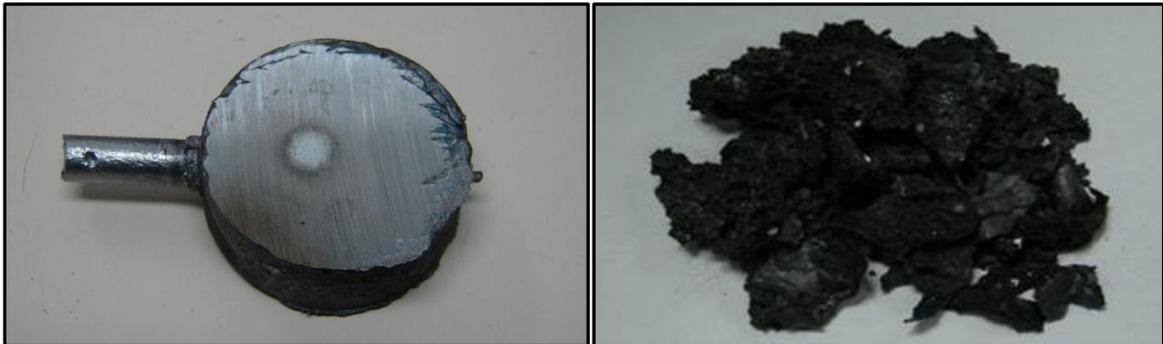


Figura 34 - Amostra de aço tipo “*sample on line*” ou “pirulito” (esquerda) e de escória (direita) retiradas ao final de cada corrida para análise de composição química.

Fonte: Gerdau, 2012.

Os resultados obtidos com as amostras de aço e de escória foram submetidos ao método de análise de variância – ANOVA, o qual consiste em um modelo estatístico onde a variância amostral é particionada em diversos componentes, devido a diferentes fatores (variáveis), que nas aplicações estão associados a um processo, produto ou serviço. Através desta partição, a ANOVA estuda a influência destes fatores na característica de interesse. Este é um método amplamente difundido e atualmente aplicado em áreas diversas como da medicina, para medir a eficácia de um novo medicamento para o tratamento de determinada doença, ou da indústria geral para aumentar a durabilidade de um determinado componente para sapatos, por exemplo. Em virtude da farta literatura disposta para o tratamento do tema, e dos muitos softwares comerciais utilizados para aplicação deste método, neste trabalho não serão abordadas, deduzidas ou desenvolvidas as equações descritivas do modelo estatístico. Guimarães (2007) apresenta de forma muito clara e didática os conceitos e a aplicação da ANOVA, porém, um tema a ser melhor elucidado para o entendimento dos resultados avaliados no presente trabalho é o conceito de significância estatística.

A significância estatística de um resultado é uma medida estimada do seu grau de veracidade, no sentido de que este traduza com fidelidade os efeitos impostos sobre uma população, sempre no sentido de exprimir a "representatividade" da mesma. De forma técnica, o valor do nível-p representa um índice decrescente da confiabilidade de um resultado. Quanto mais alto o nível-p, menos se pode acreditar que a relação observada entre as variáveis na amostra é um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis na população. Especificamente, o nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como "representativo da população". Por exemplo, um nível-p de 0,05 (1/20) indica que há 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis, encontrada na amostra, seja "obra do acaso". Em outras palavras, assumindo que não haja relação entre aquelas variáveis na população e o experimento de interesse seja repetido várias vezes, poder-se-ia esperar que, em aproximadamente 20 realizações do experimento, haveria apenas uma em que a relação entre as variáveis seria igual ou mais forte do que a observada naquela amostra anterior. Em muitas áreas de pesquisa, o nível-p de 0,05 é costumeiramente tratado como um "limite aceitável" de erro, este foi o fator considerado nesta interpretação dos resultados. Para que uma variável estudada neste trabalho seja considerada representativa e influente sobre o resultado, o valor F calculado deverá ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ , o qual foi determinado para uma relação nível-p igual 0,05.

Não há meio de evitar arbitrariedade na decisão final de qual nível de significância será tratado como realmente "significante". Ou seja, a seleção de um nível de significância acima do qual os resultados serão rejeitados como inválidos é arbitrária. Na prática, a decisão final depende usualmente de: se o resultado foi previsto "*a priori*" ou apenas "*a posteriori*" no curso de muitas análises e comparações efetuadas no conjunto de dados; no total de evidências consistentes do conjunto de dados; e nas "tradições" existentes na área particular de pesquisa. Tipicamente, em muitas ciências, resultados que atingem nível-p 0,05 são considerados estatisticamente significantes, mas este nível ainda envolve uma probabilidade de erro razoável da ordem de 5%. Resultados com um nível-p 0,01 são comumente considerados estatisticamente significantes, e com nível-p 0,005 ou nível-p 0,001 são frequentemente chamados

"altamente" significantes. Estas classificações, porém, são convenções arbitrárias e apenas informalmente baseadas em experiência geral de pesquisa. Uma consequência óbvia é que um resultado considerado significativo a 0,05, por exemplo, pode não sê-lo a 0,01. O software estatístico utilizado para os cálculos foi o Minitab versão 16, do fabricante Minitab.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS CAREPAS

#### 5.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Inicialmente, será preciso considerar a diferenciação do tamanho das partículas percebido nas carepas das laminações, pois as carepas formadas apresentaram proporções granulométricas distintas a olho nu, o que acabou por conduzir a estratégia de amostragem no início desse trabalho. Foi realizada análise aproximada da relação volumétrica entre as carepas para determinar as frações assim chamadas carepas finas e grossas das laminações 1 e 2. A figura 35 faz a comparação das morfologias destas carepas, e a tabela 7 relaciona a proporção volumétrica das carepas finas e grossas.



Figura 35 - Comparação da morfologia das carepas grossas da laminação 1 e 2 (LG) e carepas finas da laminação 1 e 2 (LF).

Tabela 7 – Proporção volumétrica entre carepas de morfologia fina e grossa.

	CAREPA GROSSA (%)	CAREPA FINA (%)
LAMINAÇÃO 1	85	15
LAMINAÇÃO 2	79	21

A maior parte das carepas das duas laminações tem morfologia grosseira, o que resulta em menor superfície de adsorção para elementos líquidos, sendo que este resultado deve ser ratificado pelas análises de quantificação de água e óleo adiante. A

distribuição granulométrica das amostras de carepa das laminações é mostrada nas figuras 36 e 37.

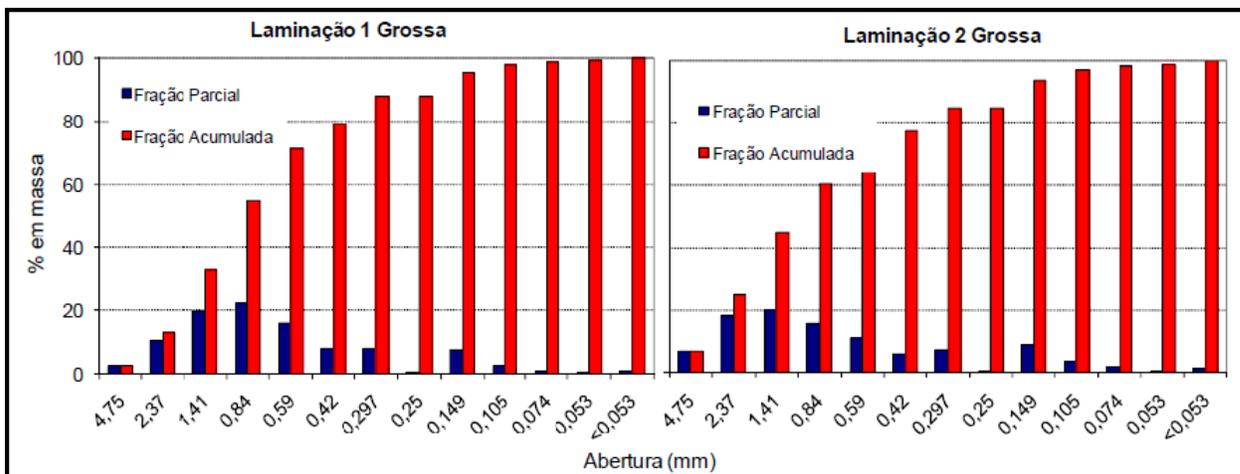


Figura 36 - Distribuição granulométrica das carepas grossas das laminações.

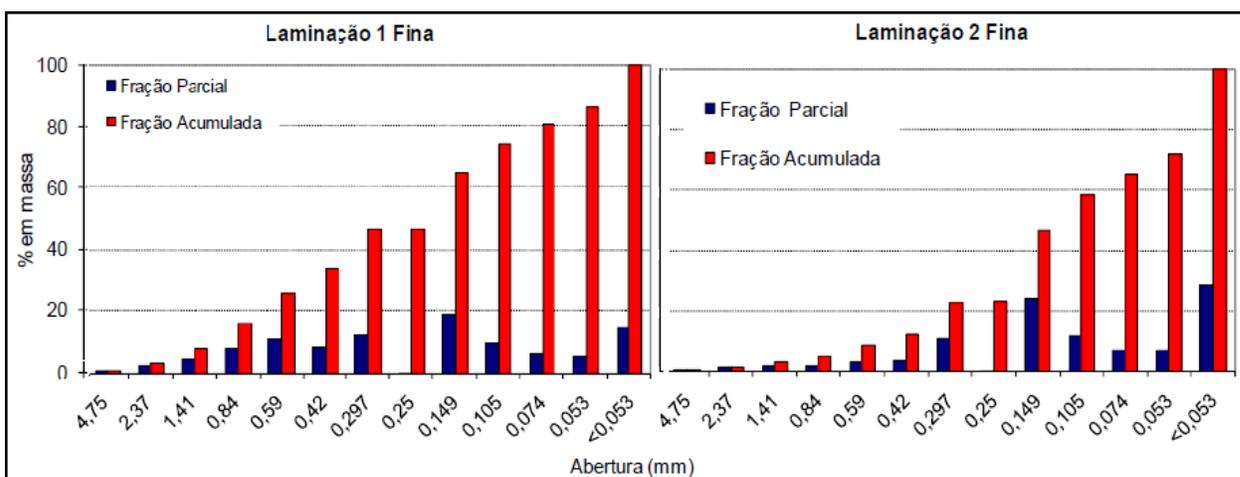


Figura 37 - Distribuição granulométrica das carepas finas das laminações.

Na figura 36 é possível verificar uma distribuição similar entre as carepas grossas das laminações, e constatar que mais de 80% das partículas se apresentam com tamanho maior que 0,25mm. Por outro lado, na figura 37, o perfil de distribuição granulométrico das carepas de morfologia fina mostra uma porção de partículas maiores para a carepa fina da L1 quando comparada com a carepa da L2. Isso ocorre porque aproximadamente 45% da massa de carepa fina da L1 está situada na faixa

característica de carepas grossas, acima do tamanho de 0,25mm. Ao observar o perfil médio da distribuição granulométrica das carepas de Laminação 2, verifica-se que metade da massa encontra-se acima da faixa de 0,25mm. Cunha (2006) conduziu uma caracterização semelhante para carepas de laminação, encontrando percentual de distribuição pouco maior de 50% para faixas acima de 0,210mm. Ainda é possível perceber que na carepa fina da L2 encontra-se uma parcela significativa de quase 30% de partículas com tamanhos abaixo de 0,053mm. Esse pode acabar sendo um fator negativo, pois trabalhar com finos de qualquer material pode ser um fator complicador.

A figura 38 mostra a distribuição granulométrica das amostras de carepa misturada ao final do processo de peneiramento.

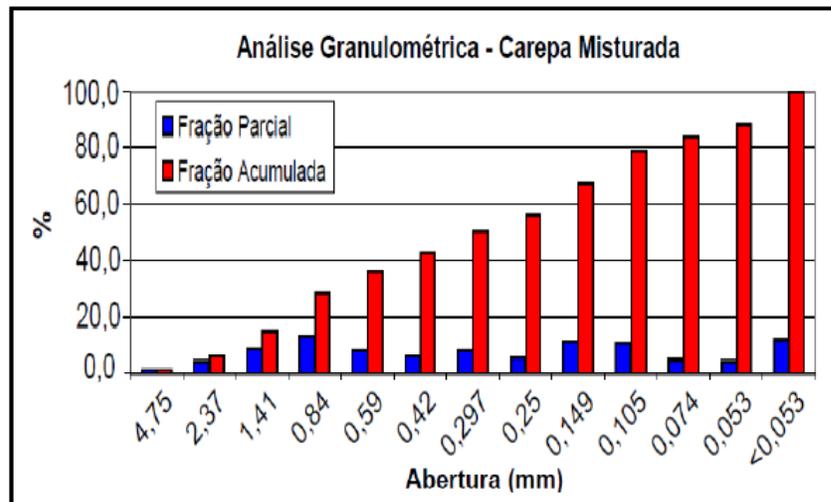


Figura 38 - Distribuição granulométrica das carepas misturadas.

Ao observar na figura 38 os resultados para distribuição granulométrica das amostras de carepas misturadas, verifica-se um fracionamento homogêneo e uma distribuição quase igualitária entre as peneiras. Isso ocorre porque o volume de carepas gerados na usina passa por um processo de peneiramento, o qual já fora explanado ao final da sessão 4.1, que acaba por promover uma cominuição parcial da carepa. Como este beneficiamento é desnecessário para aplicação da carepa “*in natura*” no FEA, este efeito pode ser desprezado.

De forma geral, a distribuição granulométrica das carepas é um fator importante a ser considerado quando da escolha da alternativa de reciclagem, pois segundo

estudos de Bagatini (2011), é possível associar o tamanho de partícula e porosidade com o potencial de redução do óxido de ferro contido no resíduo. O autor afirma que as carepas com melhor potencial de redutibilidade são aquelas de maior área superficial e, portanto, de menor granulometria.

### 5.1.2 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE E ÓLEO

A tabela 8 mostra os resultados dos ensaios de quantificação de umidade e óleo das amostras de carepas.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de quantificação para umidade e óleo.

<b>AMOSTRA</b>	<b>UMIDADE (% em massa)</b>	<b>ÓLEO (% em massa)</b>
<b>LF1</b>	17,9	0,4
<b>LF2</b>	20	0,6
<b>LG1</b>	6,6	0
<b>LG2</b>	3,3	0
<b>CM</b>	6,4	-

Observa-se, a partir dos resultados, que as carepas identificadas como finas apresentam um volume considerável de umidade, praticamente na faixa de 20%, fator que pode ser considerado negativo para uma aplicação no forno elétrico por demandar um maior consumo energético. Mesmo as carepas grossas apresentam um teor de umidade que não é insignificante, variando entre 3,3 a 6,6%. O teor de óleo em todas as amostras se mostrou baixo ou nulo, não sendo este um fator relevante a ser considerado para sua reciclagem em forno elétrico a arco.

Em sua caracterização, Cunha (2006) encontrou valores pouco significantes para os teores de umidade e óleo em carepas. Seus resultados tornam-se um indicativo que é possível minimizar a presença de água na carepa, a partir de uma determinação de

um tempo mínimo de estocagem em local apropriado, protegendo o resíduo da chuva e promovendo a drenagem do volume hídrico da sua composição.

### 5.1.3 ANÁLISE QUÍMICA DO FERRO POR VIA ÚMIDA

Os resultados da análise química por via úmida das amostras de carepa estão expressos na tabela 9.

Tabela 9 – Resultados de análise química via úmida para as amostras estudadas.

<b>AMOSTRA</b>	<b>Fe TOTAL (% em massa)</b>	<b>Fe METÁLICO (% em massa)</b>
<b>LF1</b>	71,0	0,45
<b>LF2</b>	70,0	0,68
<b>LG1</b>	73,0	0,14
<b>LG2</b>	72,3	0,19
<b>CM</b>	71,4	0,30

Constata-se que a quantidade de ferro metálico contida nas carepas é inexpressiva. Por outro lado, confirma-se o potencial de reciclagem deste resíduo ao se avaliar a quantidade de ferro total presente na sua composição. O ferro total encontrado através dessa análise é coerente com os resultados encontrados em trabalhos de caracterização dessa mesma natureza, indicando um teor de ferro próximo a 70% (CUNHA, 2006). Contudo, a consequência imediata é de que este ferro será encontrado de forma combinada entre compostos óxidos.

### 5.1.4 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Um difratograma das amostras de carepas da laminação grossa 1 é mostrado na figura 39, onde é possível a identificação das fases presentes no material.

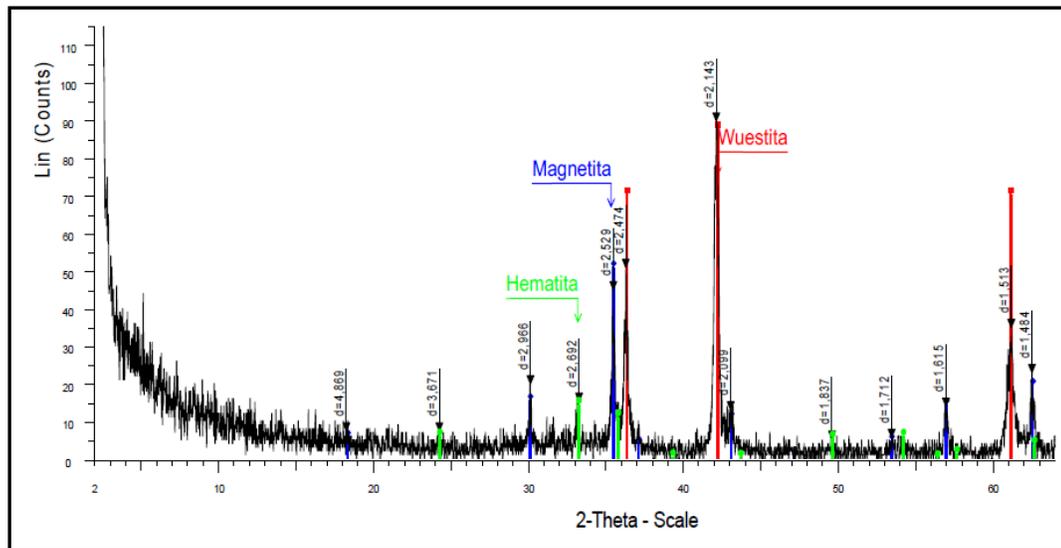


Figura 39 - Difratoograma característico das carepas LG1 (laminação grossa 1).

A presença do elemento oxigênio na carepa se confirma através dos resultados da análise DRX, porém de forma qualitativa. Nos difratogramas das carepas analisadas, o perfil de fases identificadas apontou a presença das três fases oxidadas do ferro: a wustita ( $\text{FeO}$ ) em proporção majoritária, em seguida a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e, por fim, a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em menor quantidade. Bagatini (2011) e Buzin (2009) apresentam difratogramas de amostras de carepas coerentes com os resultados aqui encontrados, descrevendo as mesmas fases óxidas em natureza e proporção. Todas estas fases foram identificadas na mesma proporção e intensidade dos picos, para todas as amostras, porém aqui a ilustração foi sintetizada na figura 39.

Por similaridade, os difratogramas individuais das amostras foram suprimidos e representados por um único gráfico. Os demais gráficos estão expostos como anexos no final deste trabalho.

### 5.1.5 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER (EM)

A quantificação das fases óxidas contidas na carepa foi realizada por espectroscopia Mössbauer, e os resultados dessas análises são apresentados na tabela 10, para todas as amostras de carepas. O espectro característico da análise é mostrado na figura 40.

Tabela 10 - Resultado quantitativo obtido através da espectroscopia Mössbauer e a relação atômica O/Fe das carepas.

AMOSTRA	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% em massa)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (% em massa)	FeO (% em massa)	O/Fe
LF1	18,1	30,7	51,2	1,22
LF2	9,7	29,1	61,2	1,18
LG1	3,8	22,3	73,9	1,13
LG2	7,5	22,9	69,6	1,15
CM	4,2	37,1	58,7	1,18

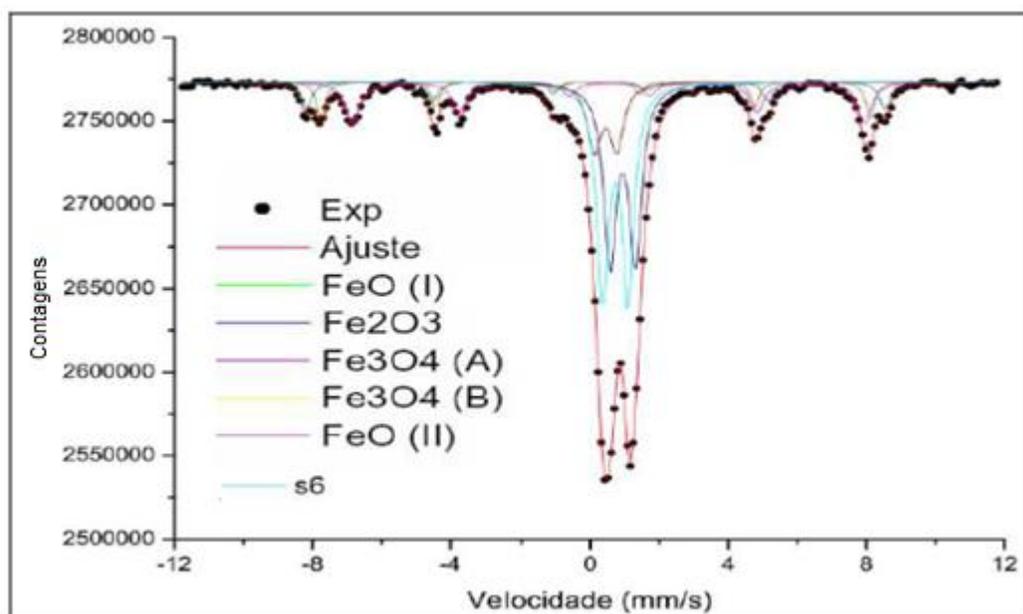


Figura 40 - Espectro característico obtido por análise de EM.

Esta técnica é considerada de grande precisão para análise dos compostos associados ao ferro, quantificando e qualificando de forma seletiva apenas os compostos associados ao ferro e desconsiderando os demais presentes. A análise confirma, portanto, os resultados mostrados anteriormente, os quais indicam que o ferro está presente essencialmente na forma de óxidos. A análise mostra ainda que, para todas as amostras, a wustita é o principal constituinte da carepa, seguido dos óxidos magnetita e hematita, nessa ordem de importância quantitativa, conforme previsto

inicialmente nas análises de DRX e constatando-se a mesma tendência quantitativa encontrada na literatura (CUNHA, 2006 e BALAJEE, 1995).

A partir da quantificação dos óxidos de ferro da análise de Mössbauer, foi estabelecida a relação entre O/Fe presentes nas amostras estudadas. As carepas grossas apresentaram menor relação entre esses elementos, ou seja, estão em um estado menor de oxidação quando comparadas com as carepas de morfologia fina. Esse fator pode facilitar a reciclagem das carepas grossas, pois estas tendem a ter maior redutibilidade (BAGATINI, 2011), além de ser a morfologia produzida em maior quantidade na Usina.

## 5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO EM FORNO MUFLA

### 5.2.1 ENSAIOS DE AUTORREDUÇÃO

#### 5.2.1.1 MINI BAGS COM CONSTITUINTES ESTRATIFICADOS

Os gráficos das figuras 41 e 42 mostram os resultados dos ensaios de autorredução das amostras com os constituintes dispostos de forma estratificada.

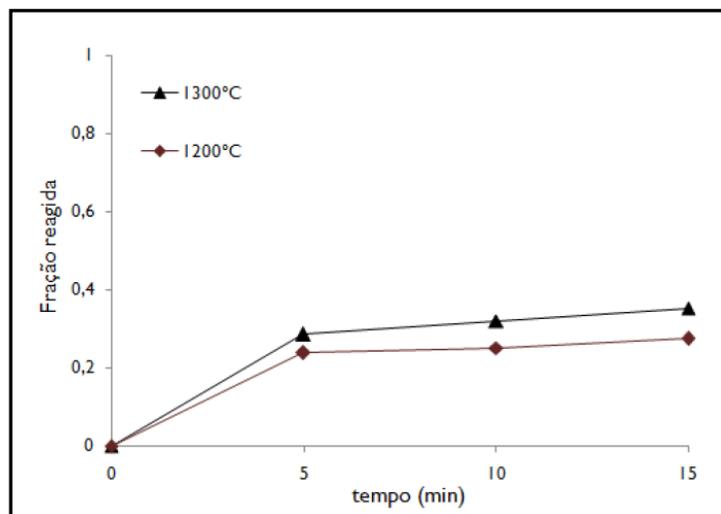


Figura 41 - Fração reagida para os ensaios de autorredução com carepa e coque dispostos de forma estratificada no “mini bag”.

Nos primeiros 5min de ensaio da figura 41, verifica-se uma inclinação mais acentuada das curvas, ou seja, uma maior taxa de reação dos ensaios proporcionalmente ao tempo e temperatura, a qual é resultado das perdas de umidade, queima do óleo e desvolatilização do coque de petróleo. Também é possível que os baixos valores de fração reagida possam ser atribuídos à uma redução parcial da hematita para magnetita. A partir deste momento, iniciam-se as reações de autorredução, onde wustita tenderá a ser reduzida, e a perda de massa ocorre pela reação do carbono com  $\text{CO}_2$ , conforme a reação de Boudouard, e do CO gerado com o oxigênio do óxido. Porém, baixas taxas de redução são observadas, pois são consequência de baixos potenciais de redução (baixa relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$ ), o que por sua vez implica em baixa metalização do ferro, apesar de haver temperaturas elevadas. Existe uma condição energética para que a redução ocorra, contudo, não há qualidade do gás redutor, ou conforme já dito, suficiente potencial de redução. Em seu trabalho, Noldin (2002) descreve a influência da temperatura nas reações de redução, e sustenta que, para temperaturas acima de  $1200^\circ\text{C}$ , os mecanismos químicos tendem a auxiliar essas reações.

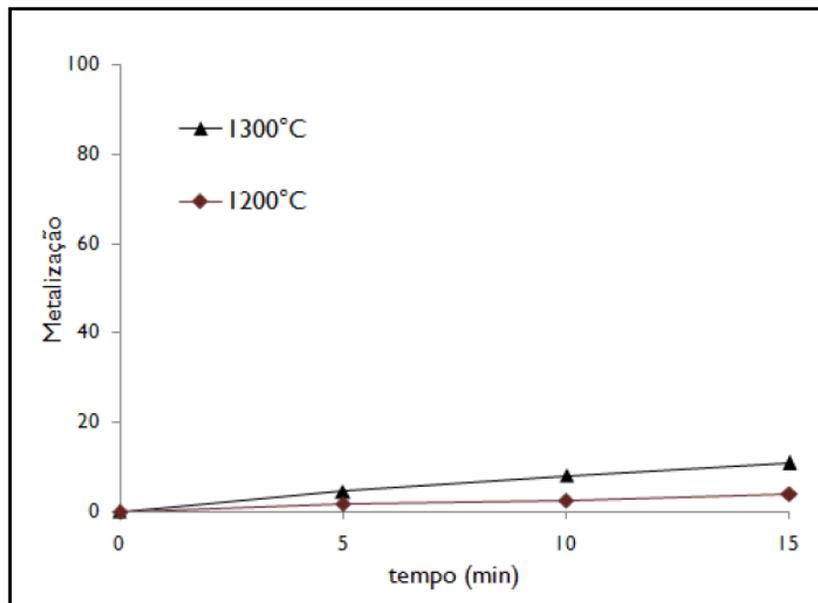


Figura 42 - Grau de metalização para os ensaios de autorredução com carepa e coque dispostos de forma estratificada no “mini bag”.

Avaliando o gráfico da figura 42, comprova-se pela inclinação da curva um comportamento linear entre o grau de metalização e o tempo de ensaio. Para os primeiros 5min de ensaio, praticamente não há evidências de metalização, e mesmo em condições de temperaturas mais elevadas (1300°C), ou seja, em condições termodinâmicas mais favoráveis, observa-se que, no maior tempo do ensaio (15 min), a metalização máxima atingida foi de apenas 11%. Dessa forma, os resultados de metalização das amostras se mostram baixos e coerentes com o comportamento das frações reagidas verificadas no gráfico da figura 41, confirmando os baixos potenciais de redução. Os resultados de redução obtidos a partir do aquecimento da carepa e agente redutor colocados de forma estratificada na amostra podem ser os direcionadores quanto aos resultados esperados para os testes práticos no FEA, haja vista que o modelo de introdução da carepa seguirá a proposta de estratificação.

### 5.2.1.2 MINI BAGS COM CONSTITUINTES MISTURADOS

Os gráficos das figuras 43 e 44 mostram os resultados dos ensaios de autorredução das amostras com os constituintes dispostos de forma homogênea.

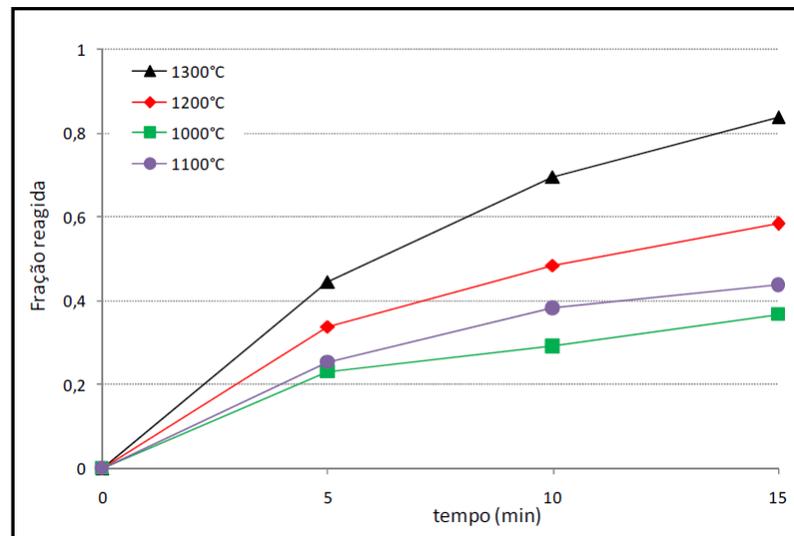


Figura 43 - Fração reagida para os ensaios de autorredução com carepa e coque misturados no “mini bag”.

Diferentemente das curvas apresentadas no gráfico da figura 41, as curvas de fração reagida para o caso dos constituintes homogeneamente misturados, vistos na figura 43, apresentam frações reagidas maiores, entre 30 e 40% para temperaturas de 1200 e 1300°C, para tempo de ensaio de 5min. Este efeito evidencia que as reações de perda de umidade, óleo, desvolatilização e redução dos óxidos de ferro são fortemente dependentes da forma como os constituintes foram arranjados nas amostras. Com a mistura, a redução ocorreu de forma efetiva, pois o potencial de redução do gás aumentou. Como é de conhecimento, a redução com redutor sólido se dá pela reação tipo sólido-sólido via intermediário gasoso. No arranjo misturado, as reações de Boudouard no redutor e de redução na carepa tornaram-se mais efetivas, gerando uma composição gasosa de maior potencial redutor. Composição essa fortemente afetada pela temperatura em muitos casos. Sendo assim, percebe-se facilmente que a máxima fração reagida para 1300°C é de cerca de 30% pelos resultados da figura 41, ao passo que na figura 43, para esta mesma condição, tem-se uma fração reagida acima de 80%, comprovando o fato de que o arranjo dos constituintes é um fator importante.

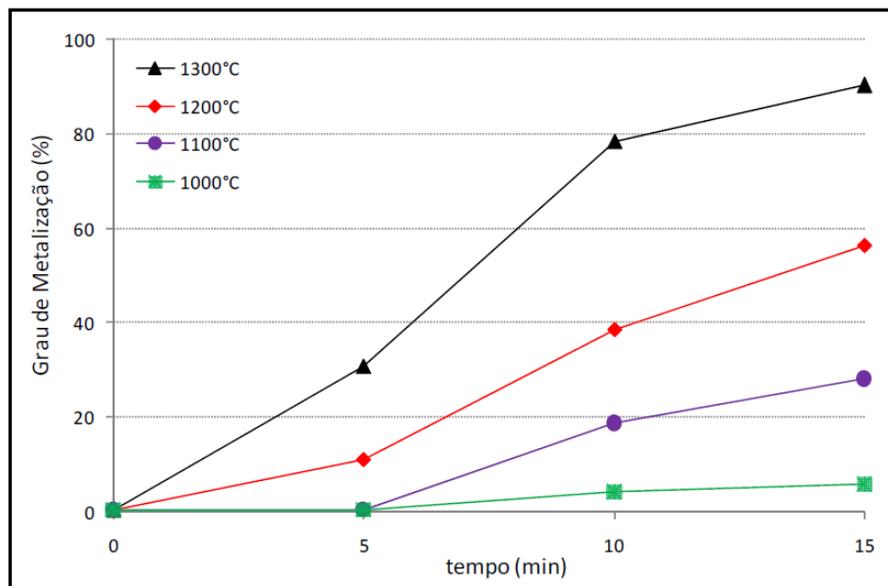


Figura 44 - Grau de metalização para os ensaios de autorredução com carepa e coque misturados no “mini bag”.

Avaliando de forma conjunta os gráficos das figuras 43 e 44, observa-se que a evolução da fração reagida (definida no item 4.3) é acompanhada pelo aumento no grau de metalização das amostras de forma muito mais significativa do que nos ensaios das amostras estratificadas. Nas condições propostas para tais ensaios, nota-se uma forte influência da temperatura sobre aumento da metalização das amostras. Na temperatura de 1300°C, por exemplo, em apenas 10 minutos de ensaio, cerca de 80% do ferro contido na amostra já se apresenta na forma metálica. Ao passo que na temperatura de 1000°C, o aumento de metalização é relativamente lento, e assemelha-se ao comportamento de uma amostra estratificada nos ensaios a 1200 e 1300°C.

Em seus estudos, Buzin (2009) mostrou resultados de metalização semelhantes para briquetes autorredutores. Entretanto, esta constatação evidencia que a alternativa mais viável para se obter os melhores resultados de metalização da carepa no FEA seria a partir da introdução desta carepa misturada homoganeamente ao agente redutor, devido a promover um mecanismo mais favorável para que as reações ocorram. Caso o redutor não esteja em contato íntimo com a carepa, é possível que os gases redutores gerados não realizem o trabalho de redução, e se dispersem na atmosfera do FEA. Outro fator positivo apontado pelos ensaios de autorredução é que o maior tempo de ensaio, no caso 15min, corresponde ao tempo de fusão encontrado no FEA, assemelhando-se dessa forma às condições dos testes práticos.

De modo geral, a partir da mistura íntima da carepa com o agente redutor, atingiu-se níveis elevados de redução dos óxidos de ferro no estado sólido, demonstrando assim o forte potencial de recuperação do ferro da carepa através desta técnica.

## **5.2.2 ENSAIOS DE REDUÇÃO-FUSÃO**

### **5.2.2.1 ANÁLISE DA FRAÇÃO REAGIDA**

Os ensaios foram conduzidos em regime não-isotérmico até a temperatura de 1500°C, conforme apontado na figura 29. No gráfico da figura 45 são mostrados os resultados de fração reagida em função do tempo de ensaio.

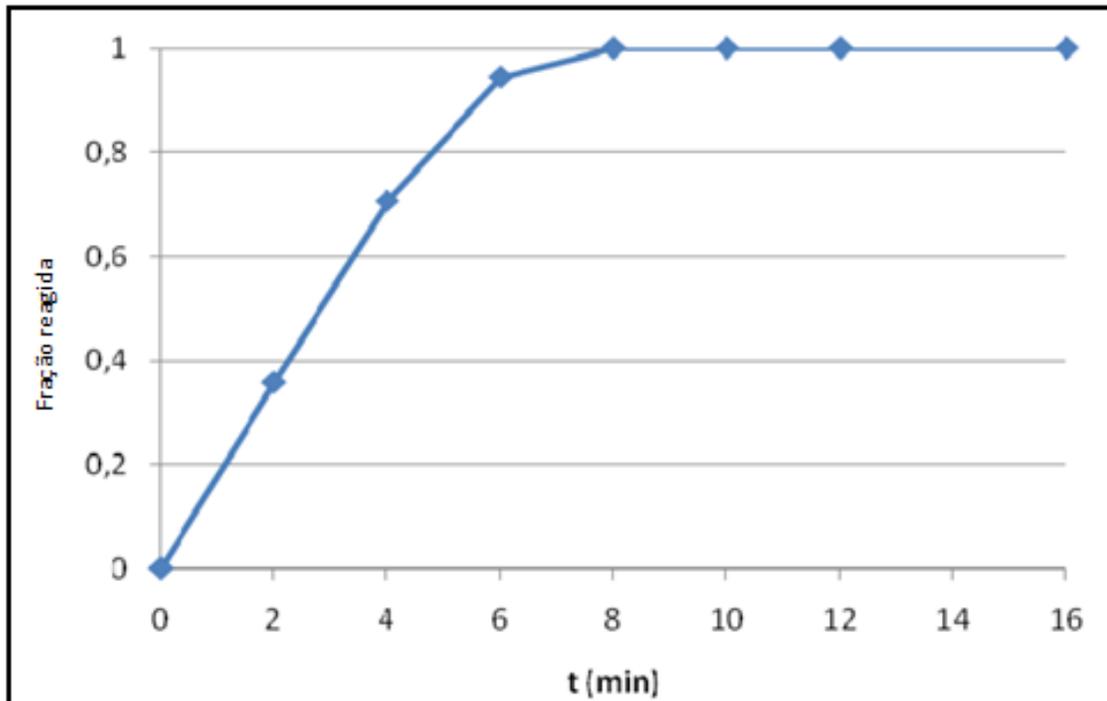


Figura 45 - Fração reagida para os ensaios de redução-fusão em forno mufla a 1500°C.

Percebe-se no gráfico da figura 45 que a fração reagida aumenta com o tempo e temperatura e, semelhantemente aos resultados anteriores, a queima dos voláteis contribui para uma taxa mais elevada no início do teste. A curva de fração reagida para as amostras revelou comportamento linear para tempos próximos a 6 minutos. A partir de então, verificou-se uma diminuição da velocidade de perda de massa (fração reagida) entre os tempos de 6 e 8 minutos nesse teste. Em experimentos semelhantes, Flores (2011) justifica, após 6 minutos, que a taxa de conversão se torna lenta devido ao baixo teor de reagentes (carbono e óxidos de ferro) remanescentes na mistura autorredutora. Outra constatação é que a máxima conversão das amostras foi alcançada com 8 minutos de ensaio e, após esse tempo, não há mais fração mássica reagindo, pois foi alcançado o índice de 100%.

Esse ensaio foi desenvolvido em temperatura de 1500°C e, portanto, muito mais próxima da operação do FEA, comprovando mais uma vez que as frações reagidas e o grau de metalização são fortemente dependentes da temperatura.

### 5.2.2.2 AVALIAÇÃO DO GRAU DE METALIZAÇÃO

Para avaliar o rendimento metálico dos testes de redução-fusão, foi realizada análise química dos corpos de prova por via úmida. Os resultados de ferro total, ferro metálico e metalização ( $Fe^0/Fetotal$ ) são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Análise das amostras por via úmida antes/após ensaios de redução-fusão.

Tempo de Ensaio	Ferro Total (%)	Ferro Metálico (%)	Metalização (%)
Antes do ensaio	58,6	0,3	~0
2	66,4	8,8	13,3
4	78	51	65,4
6	92,7	79,1	85,3
8	96,4	88,2	91,5
10	95,8	88,5	92,4
12	97,3	93,9	96,5

Pelos valores apresentados na tabela 11, pode-se verificar que antes do ensaio a mistura apresentava metalização quase nula, devido ao baixo teor de ferro metálico contido na carepa. Nas amostras que foram submetidas aos ensaios de redução-fusão, para tempos de até 8 minutos, verificou-se aumento nos três indicadores: ferro total, ferro metálico e metalização. No período entre 8 e 10 minutos, as amostras não apresentaram variações significativas de ferro metálico e metalização, ambos abaixo de 1%.

Porém, é importante salientar que, apesar desses valores serem baixos, quando comparados com indicadores operacionais de FEA, como o rendimento metálico global de uma corrida, por exemplo, estes podem representar ganhos substanciais. Contudo,

ainda com 12 minutos de ensaio, constata-se um pequeno aumento da metalização em relação aos tempos anteriores, e o valor máximo de metalização atingida nos ensaios de redução-fusão para condições de rápido aquecimento (96,5%) se mostrou bastante satisfatório.

Ressalta-se, ainda, que a diferença entre os teores de ferro total e  $\text{Fe}^0$  representa a quantidade de ferro que permanece sob sua forma oxidada. Desta forma, a pequena diferença entre esses dois indicadores, para a amostra de 12 minutos, reflete o baixo teor de ferro sob a forma oxidada no produto formado, o qual é benéfico para processos de fabricação de aço.

Uma análise da morfologia das amostras obtidas torna-se aqui interessante para evidenciar os produtos formados. Através de análises visuais, a sequência de fotografias da figura 46 ilustra a evolução das amostras ao longo do período de ensaio. Observa-se que, em tempos inferiores a quatro minutos (46a e 46b), o produto formado tem aspecto granulado, com fácil distinção entre os óxidos de ferro e o carbono. Após 6 minutos (figura 46c), ocorre uma mudança relevante na morfologia das amostras, as quais passam a ter uma forma aglomerada porosa, devido à fusão incipiente do ferro formado e geração de gases redutores.

Jie (2008) conduziu experimentos de redução de  $\text{FeO}$  em atmosfera de  $\text{CO}$  com resultados positivos, transformando carepa de laminação em ferro metálico poroso. Com essa nova morfologia, o material passa a apresentar certa resistência mecânica, a qual pode ser fundamental no interior de fornos elétricos. A principal mudança observada em tempos entre 8min (figura 46d) e 10min (figura 46e) foi a contração das amostras, devido ao progressivo aumento da quantidade de regiões fundidas. A completa fusão do material (figura 46f e 46g) se deu em 12 minutos de ensaio, o que se manteve até a marca de 16 minutos.

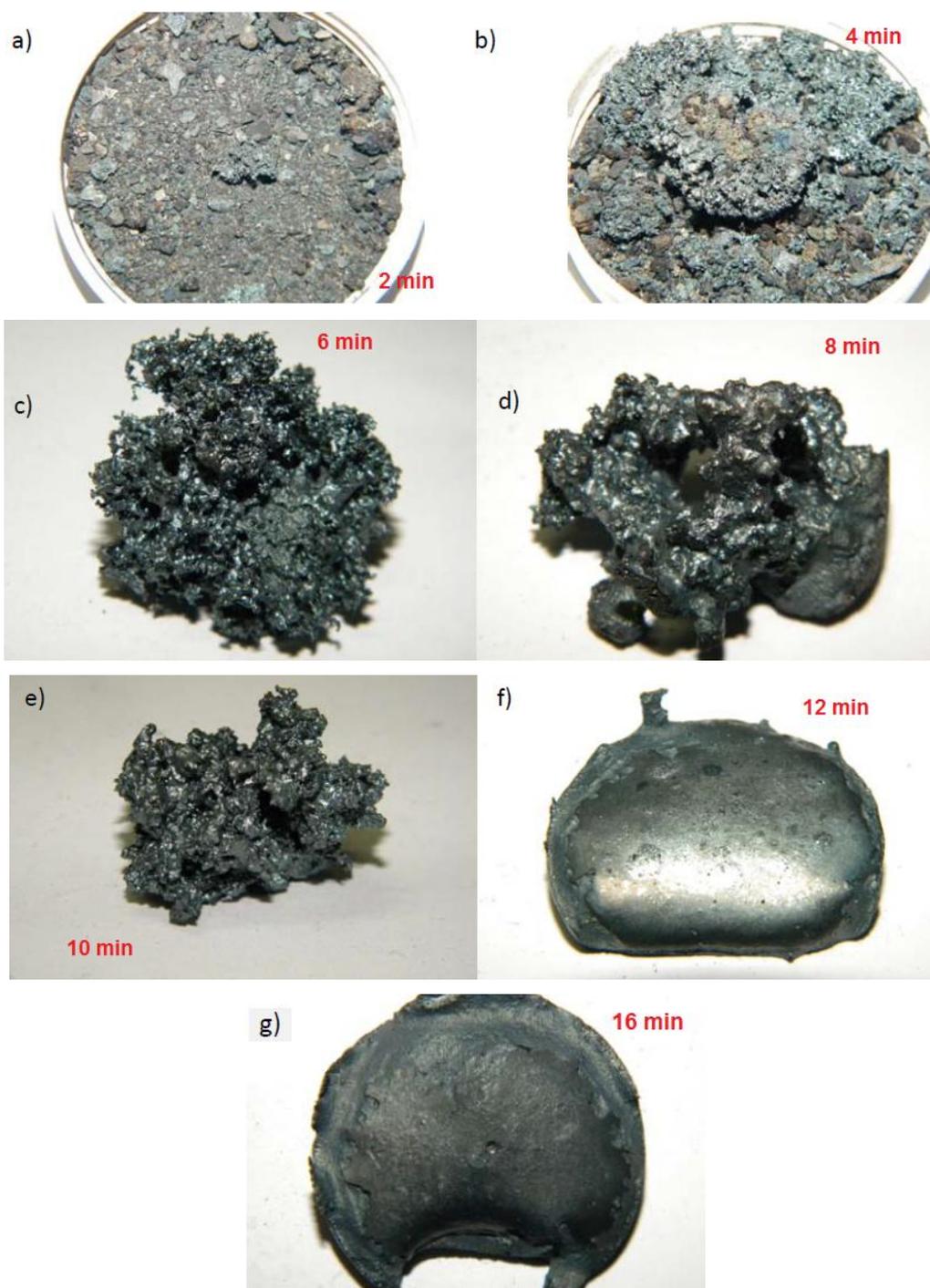


Figura 46 - Morfologia das amostras em ensaio de redução-fusão após, a) 2, b) 4, c) 6, d) 8, e) 10, f) 12, g) 16 minutos.

Percebe-se que a amostra com menor tempo de residência no forno apresenta uma coloração mais escurecida, devido ao grande teor de carbono livre e a pouca

redução dos óxidos de ferro. Nas amostras com tempo de forno de 4 minutos, observa-se áreas de fusão parcial, principalmente na região superior da amostra, em contato com a atmosfera do forno. Isto indica que inicialmente tais áreas estejam submetidas a temperaturas mais elevadas, uma vez que a superfície superior da amostra é a única região que recebe calor pela radiação existente no interior do forno e, portanto, encontram-se as condições mais apropriadas para o desenvolvimento das reações.

A fusão incipiente das amostras une as partículas de ferro pontualmente, fenômeno similar aquele encontrado nos processos de sinterização de minérios de ferro. Dessa forma, parte do carbono não reagido pode permanecer aprisionado entre as regiões parcialmente fundidas. Acredita-se que devido sua maior reatividade, partículas de granulometria fina, participem mais ativamente da etapa de redução, enquanto as de granulometria mais grossa permanecem no sistema e irão participar efetivamente da carburação do ferro formado, ao final do processo de redução. Como resultado da maior contração das amostras, para tempos maiores a 8 minutos, partículas do material carbonoso se desagregam e ficam dispersas no fundo do cadinho, sem contato direto com o ferro formado. Geralmente, para tempos de 10 minutos, foi possível identificar o surgimento de uma pequena região completamente líquida, localizada no fundo do cadinho.

Verificou-se que após a máxima conversão a ser atingida (8 minutos), foi necessário um tempo de incubação (tempo necessário para se atingir a composição *líquido* da liga Fe-C) de 4 minutos para que a mistura se torne totalmente líquida. Este é um indicativo claro de que os processos de carburação do ferro são controladores do tempo necessário para a fusão do ferro formado. Conforme os resultados encontrados nas análises de fração reagida e via úmida, grande parte da redução dos óxidos de ferro se dá para tempos inferiores a 10 minutos e, portanto, ocorre em estado sólido ou semi-sólido. Entretanto, a máxima metalização só é atingida após a fusão completa do material. Flores (2011) sustenta em seu trabalho que isto ocorre devido aos óxidos remanescentes, durante o período de incubação por não estarem em contato físico com o carbono livre restante no sistema, porém, uma vez que a amostra atinja fusão completa, os óxidos remanescentes são reduzidos pelo carbono contido no ferro líquido.

### 5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA CAREPA NO FEA

Para auxiliar na interpretação destes resultados, é necessário ratificar que a premissa fundamental deste trabalho foi baseada em não promover alterações nos parâmetros operacionais do FEA a partir da introdução da carepa no forno, mas sim avaliar seus impactos no processo. O propósito desta avaliação será, num primeiro momento, promover a reciclagem da carepa ao menor custo e, se possível, ainda obter os ganhos relacionados à recuperação do teor metálico pelo aumento deste importante indicador do processo.

Em função de variações inerentes ao processo, o desempenho da carepa como um componente adicional à carga metálica do forno foi avaliado em dois momentos distintos: com percentual de ferro-gusa na carga de 25% e 20%. As condições operacionais se mostram bem distintas para estes percentuais de consumo, pois o ferro-gusa é fonte de energia química e por este motivo influencia todo o programa de potência e marcha do forno quando suas proporções são alteradas. Isto posto, a base de comparação dos indicadores de processo se estabeleceu sobre campanhas de produção do aço já especificado anteriormente, com e sem carepa.

#### 5.3.1 FATORES OPERACIONAIS DE MONITORAMENTO

Os indicadores definidos como fatores operacionais de monitoramento foram o consumo de oxigênio e a quantidade de coque de petróleo injetado nas corridas. Os “*boxplots*” paralelos apresentados pela figura 47 mostram os volumes de oxigênio injetado nas corridas de teste para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa na carga, em campanhas com e sem adição de carepa.

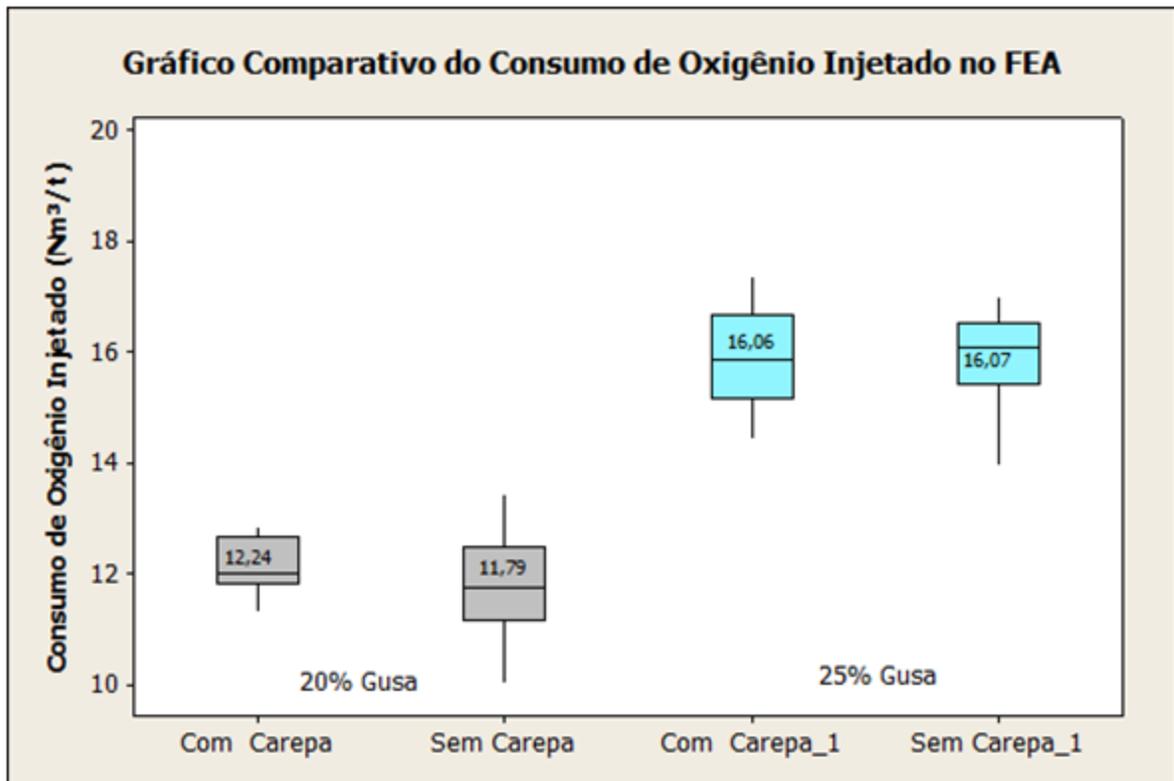


Figura 47 - “Boxplots” paralelos do comparativo do consumo de oxigênio nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

Torna-se necessário lembrar que o oxigênio total injetado em uma corrida é composto por uma parcela injetada através de bicos injetores segundo o programa de potência e, portanto, automática e dependente de cada receita, e uma segunda parcela é injetada manualmente, por meio de lanças manipuladas introduzidas pela porta de trabalho, a qual é utilizada simplesmente para acelerar o processo de fusão, “cortando” a sucata sólida, favorecendo a descida da sucata sólida para a fusão da mesma. Esta segunda parcela é injetada manualmente, a critério do operador, e não chega a representar 10% do volume total injetado no forno. Sendo o ferro-gusa fonte de energia química para o processo, pois carrega em sua composição químicos teores de carbono em torno de 4%, pode-se perceber que o nível de consumo de oxigênio é bem maior na condição de 25%. Isto se deve pelo fato de que existe a necessidade de ofertar um volume maior de oxigênio para uma maior quantidade de carbono presente na composição do ferro-gusa. Buzin (2009) previu teoricamente essa necessidade de

oxigênio e acrescentou que misturas autorredutoras, quando introduzidas no FEA, também podem requisitar oxigênio adicional. Quando ocorre a formação de CO e CO<sub>2</sub> no seio do banho líquido, tem-se uma intensa liberação de energia que permite obter ganhos na redução do consumo de energia elétrica do processo, segundo apontado nos estudos de John (2009). Fixando-se a análise no cenário de 20% de ferro-gusa, percebe-se que as médias com valores muito próximos, com ligeiro aumento do oxigênio injetado de apenas 3,8% na campanha com carepa, assim como percebe-se também uma variabilidade muito menor neste caso. No cenário de 25% de ferro-gusa, os valores centrais permaneceram praticamente inalterados.

Outro fator operacional que foi monitorado foi o coque de petróleo. Os “*boxplots*” paralelos apresentados na figura 48 mostram uma redução na quantidade de coque injetado na campanha de 20% de gusa em relação à de 25%.

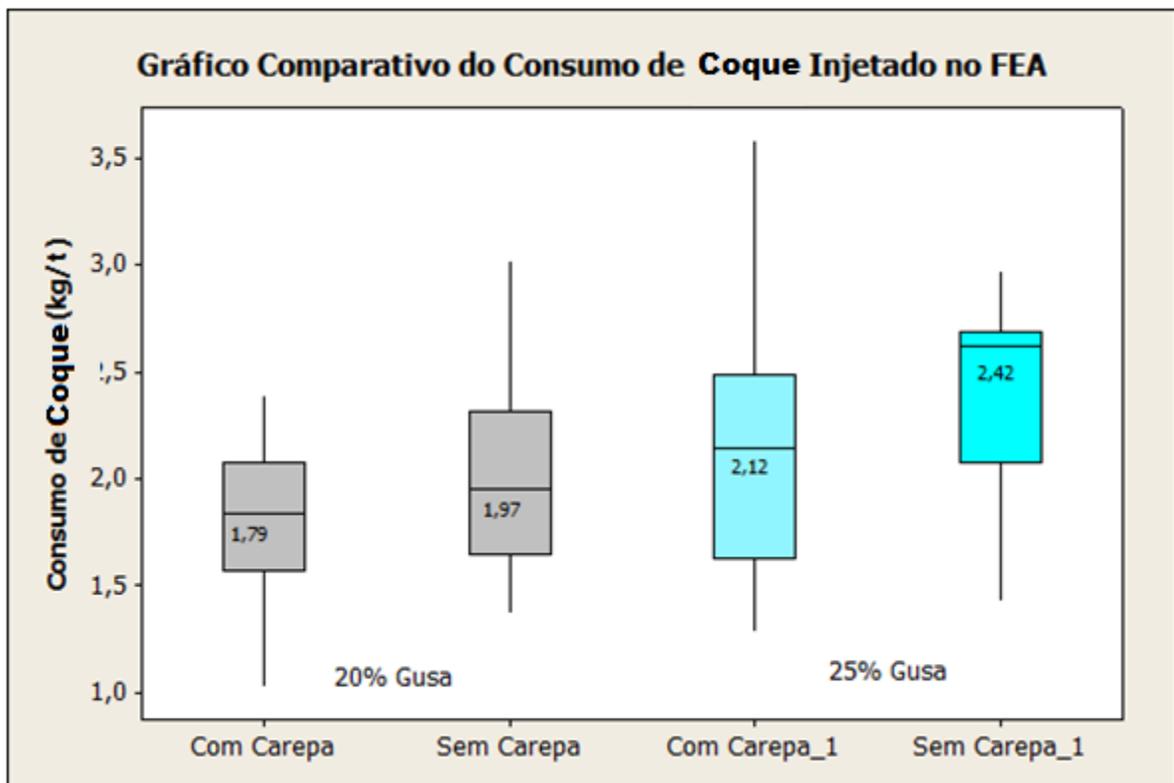


Figura 48 - “*Boxplots*” paralelos do comparativo do consumo de coque nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

O coque de petróleo é injetado por intermédio de lanças manipuladas através da porta de trabalho do forno. Essas lanças são controladas pelos operadores e a quantidade injetada deve obedecer a limites máximos e mínimos. Pela sua fina granulometria, é injetado sob a camada de escória formada durante a fase de refino, buscando reduzir os óxidos de ferro presentes na composição da mesma. A intensa geração de gases causa o efeito de escória espumante, agregando à corrida vários benefícios, conforme apontado por Ávila (2011). Quando adicionada carepa, em ambos os cenários, também houve uma redução significativa em cerca de 10% nas quantidades injetadas, além de evidenciar uma variabilidade muito maior na condição de 25% de gusa com adição de carepa.

De forma geral, observa-se que os volumes de oxigênio injetado nas condições de 20 e 25% de ferro-gusa sofrem alterações fundamentalmente pela quantidade de gusa presente na carga, e não como uma necessidade da adição de carepa. Quanto à quantidade de coque das corridas, não foi observada a manutenção dos níveis de injeção para as campanhas com e sem carepa dentro de um mesmo percentual de gusa na carga. Em princípio, oxigênio e coque injetados não deveriam sofrer influências com a introdução da carepa na carga do FEA e, portanto, não são considerados variáveis resposta deste trabalho. Entretanto, os mesmos foram monitorados devido à sua influência nos demais resultados dos testes.

### **5.3.2 FATORES OPERACIONAIS DE RESPOSTA**

#### **5.3.2.1 COMPOSIÇÃO DO FeO NA ESCÓRIA**

Os “*boxplots*” paralelos apresentados pela figura 49 mostram os teores de FeO para as campanhas com e sem carepa, nas condições de 20 e 25% de ferro-gusa na carga.

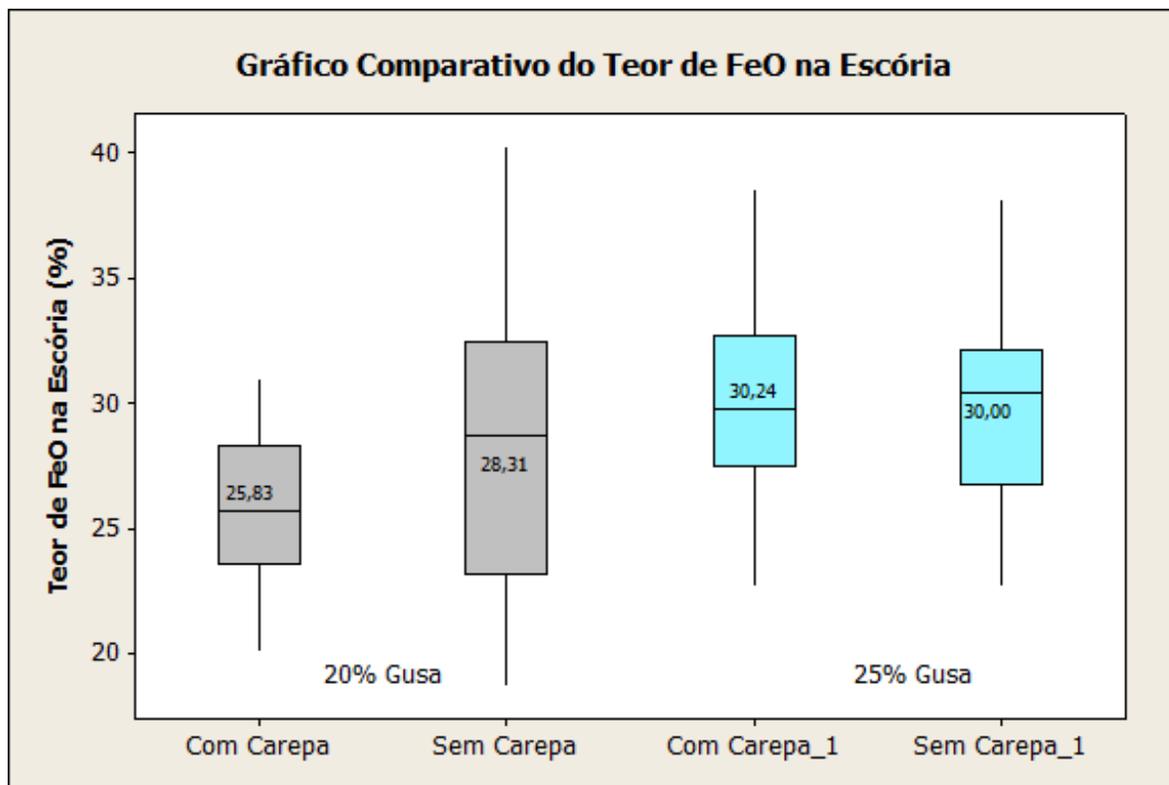


Figura 49 - “Boxplots” paralelos do comparativo do teor de FeO nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

O teor de FeO na escória é um importante indicador do processo, pois está diretamente relacionado com o rendimento metálico do FEA. Níveis baixos de FeO podem desencadear severos mecanismos de desgaste do revestimento refratário, e níveis muito elevados normalmente significam um rendimento metálico muito baixo. Portanto, uma das respostas fundamentais deste trabalho é justamente averiguar quais as variações ocorreram neste indicador com adição de carepa, e quais reflexos foram produzidos no processo, se negativos ou positivos.

Avaliando os teores resultantes na figura 49, pode-se concluir que a introdução da carepa na carga do forno não resultou em um aumento do teor de FeO presente na escória, o que pode ser considerado um fato extremamente positivo. Neto (2009) conduziu experimentos com a introdução de 1% de carepa no FEA, porém em seus resultados foi constatado elevação no teor de FeO da escória. É possível perceber que, nas campanhas de 20% de gusa, tem-se uma redução de aproximadamente 9% na média deste indicador, e com sua variabilidade significativamente reduzida. Entretanto,

do ponto de vista estatístico, estes resultados não podem ser considerados significativos, pois o fator  $F=3,8070$  calculado aparece no limiar em relação ao seu  $F_{\text{crítico}}=4,0343$ . Com 25% de gusa, tem-se a manutenção dos valores médios e nenhuma interferência na variabilidade, o que fica claramente demonstrado pelo fator  $F=0,0398$  sendo muito menor em relação ao seu  $F_{\text{crítico}}=4,0726$ .

Ao realizar análise de variância com os resultados obtidos com adição de carepa, comparando, neste caso, somente a influência do % de gusa sobre o FeO, encontra-se um valor  $F=23,4655$  para um valor de  $F_{\text{crítico}}=4,0303$ . Portanto, conclui-se que o % de ferro-gusa na carga, ou simplesmente o programa de injeção de oxigênio associado à quantidade de ferro-gusa, são fatores determinantes na influência no nível de FeO das corridas, reforçando que de fato a carepa adicionada não exerce papel modificador neste índice.

Contudo, pelos resultados apresentados nos “*boxplots*” paralelos da figura 48 mostrados anteriormente, no qual ficou evidenciado uma redução do coque de petróleo injetado nas corridas, seria praticamente uma tendência assumir valores de FeO maiores em relação aos valores-base (campanhas sem carepa). Porém, não se confirmando a tendência negativa, pode-se encarar este fato como um indicativo de que, possivelmente, as condições termodinâmicas e cinéticas no reator estejam favorecendo a redução dos óxidos presentes na carepa, contribuindo para melhoria do rendimento metálico do processo. A presença de carepa de forma geral não alterou o comportamento do teor de FeO na escória de forma significativa. O comportamento dos demais elementos formadores de escória não foram caracterizados neste momento por questões de tempo, e pela significância estatística nula apresentada na variação do FeO.

### 5.3.2.2 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO METÁLICO

Os “*boxplots*” paralelos para o rendimento metálico nas campanhas de teste, com e sem carepa, para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa são apresentados na figura 50.

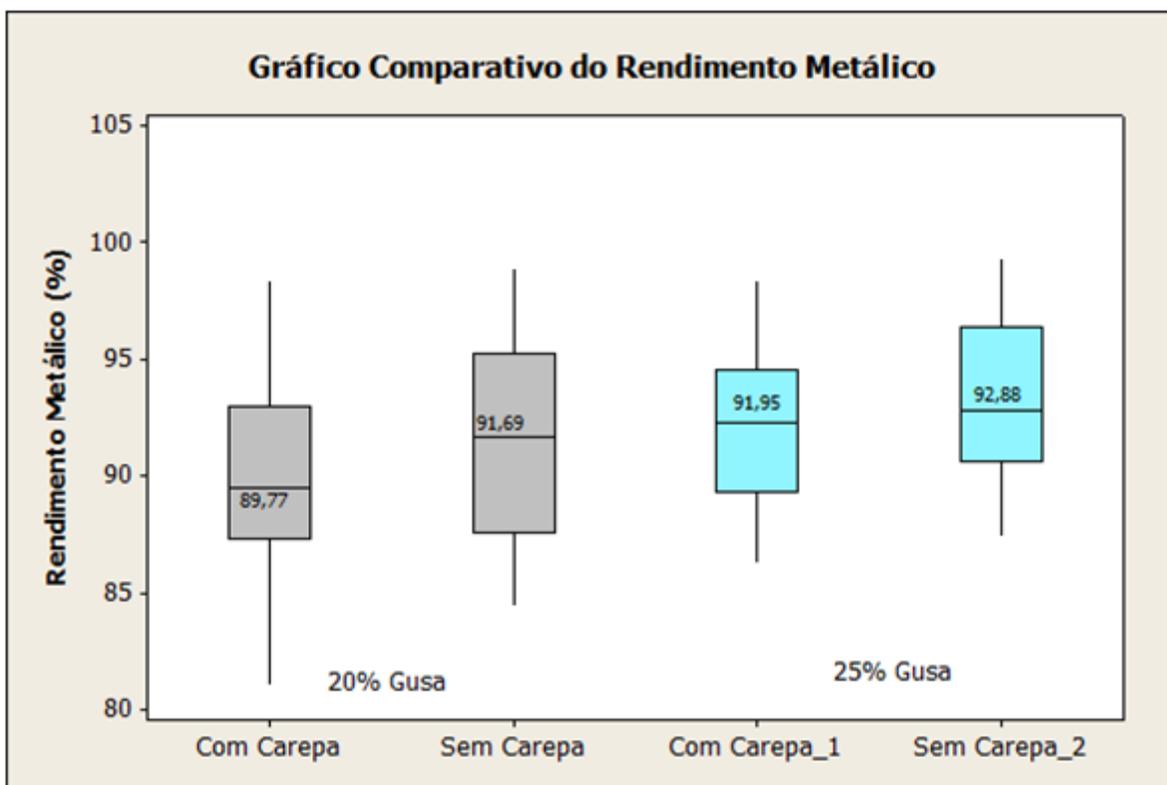


Figura 50 - “Boxplots” paralelos do comparativo do rendimento metálico nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

Apesar dos resultados positivos vistos anteriormente pela manutenção do oxigênio injetado, da pouca interferência dos valores de FeO na escória e da redução do coque de petróleo injetado, os valores para rendimento metálico não apresentaram os resultados esperados conforme hipótese levantada a partir dos teores de FeO. Pelo contrário, ocorreram perdas significativas no aço líquido vazado durante as campanhas com carepa. As perdas foram maiores na condição de 20% de gusa, onde o rendimento foi reduzido em 1,92%, ao passo que na condição de 25% de gusa, a perda foi de 0,93%, conforme demonstrado diretamente nos gráficos.

O fator  $F=2,0976$  calculado para as campanhas de 20% gusa com e sem carepa se mostrou inferior ao  $F_{\text{crítico}}=4,0343$  obtido para os resultados do experimento. O mesmo ocorreu para as campanhas de 25% gusa com  $F=0,8510$ , seguindo a mesma tendência. Estes valores sustentam, do ponto de vista estatístico, que a redução do indicador não é significativa. Entretanto, do ponto de vista prático, a redução observada no indicador de rendimento metálico é consideravelmente negativa, uma vez que

representa menos geração de produtos e suas receitas. É necessário lembrar neste momento que não foi executado controle sobre o fundo úmido do FEA, ou seja, não foi quantificada a quantidade remanescente de aço líquido após o vazamento de cada corrida. Dessa forma esta passa a ser uma fonte de incerteza quanto aos resultados acima apresentados, embora estes tenham sido caracterizadas pelas médias.

Estudos com briquetes autorredutores apontam a hipótese de queda no indicador de rendimento metálico (BUZIN, 2009), pois testes evidenciam que não há redução completa dos óxidos de ferro que compõem a carepa. Godinskii (2003) também observa que as perdas por oxidação podem afetar o rendimento de forma substancial. Além disso, ao diminuir-se o rendimento metálico, afetam-se todos os indicadores de consumo relativos à produção, elevando-se demasiadamente os custos produtivos. Esta redução de rendimento metálico, se analisado de forma independente, desconsiderando os outros resultados, inviabilizaria a reciclagem da carepa pela sua adição na carga do FEA. Por outro lado, Takano (2000) demonstra em sua análise que é possível recuperar o teor metálico em aglomerados autorredutores em condições de altas temperaturas.

Os demais resultados positivos obtidos nos testes do FEA sinalizam a possibilidade de que é possível trabalhar no incremento da injeção do coque de petróleo. Ao elevar-se o volume injetado, em relação aos valores obtidos nas campanhas sem carepa, pode afetar positivamente o resultado de rendimento metálico, alcançando objetivo pleno para reciclagem da carepa no FEA. Aplicando-se o método de regressão linear múltipla sobre os resultados práticos das corridas, foi possível obter uma relação matemática expressa através da equação (20). Inserindo-se os valores de injeção de coque, oxigênio e teor de FeO para as campanhas com carepa, na condição de 20% de ferro-gusa, chega-se à curva teórica apresentada no gráfico da figura 51.

A curva de rendimento real são os dados obtidos nos testes práticos diretamente “plotados” no mesmo gráfico.

$$\text{Rendimento (\%)} = 124 + 0,6 \times \text{Coque} - 1,75 \times \text{O}_2 - 0,163 \times \text{FeO} \quad (20)$$

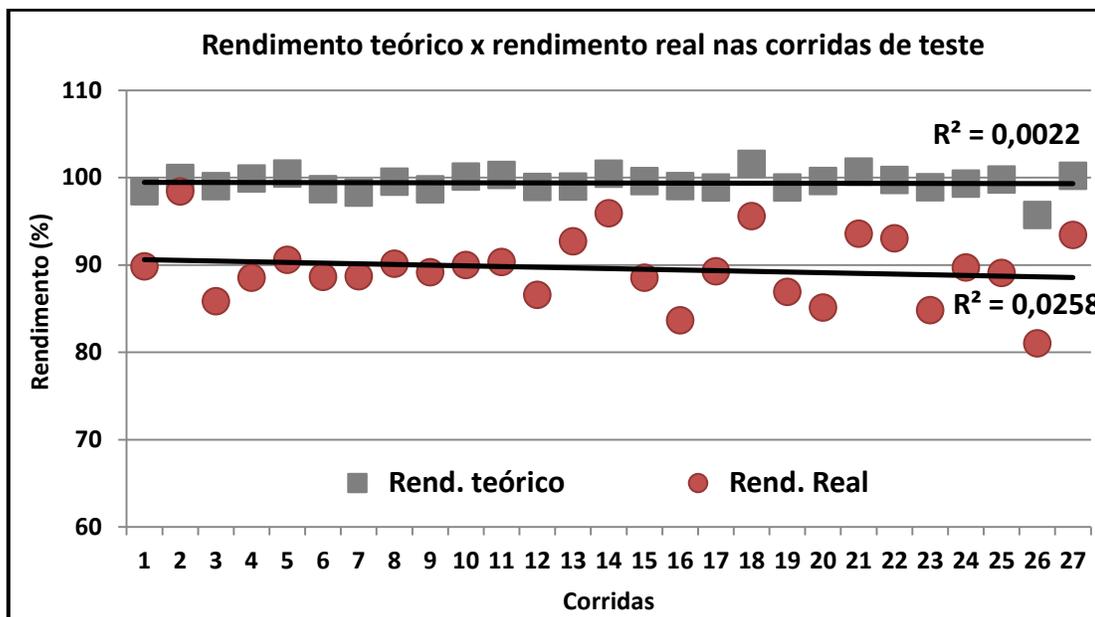


Figura 51- Relação entre rendimento real e teórico obtido para os ensaios com carepa, na condição de 20% de ferro-gusa na carga.

Em testes muito semelhantes aos deste trabalho, Neto (2009) obteve resultados de rendimento metálico positivos ao adicionar carepa no FEA. Ao observar a equação característica (20), percebe-se que o melhor rendimento é diretamente proporcional ao volume de coque de petróleo injetado no FEA, desde que atente-se para a influência da injeção de oxigênio e do teor de FeO. Isto sustenta o fato de objetivar a manutenção do volume de coque injetado nas corridas, ou ainda dentro de um critério aceitável de custos, buscar um aumento do volume de coque injetado, são medidas que podem redundar em melhores resultados de rendimento metálico nas campanhas em que a carepa for adicionada. Contudo, pela observação do gráfico teórico na figura 51, onde os valores estão situados junto a um rendimento de 100%, é possível concluir do ponto de vista prático, que estes resultados pouco representam a realidade operacional do FEA, onde as perdas por oxidação são inerentes ao reator. De qualquer forma, o indicativo de rendimento mostra um direcionamento pelo método matemático a partir dos resultados práticos obtidos nos testes com carepa. Também é possível afirmar que os elevados valores de rendimento calculados de forma teórica podem indicar que outras variáveis podem estar ausentes na relação matemática, cabendo sua consideração oportunamente.

Importante frisar que alguns fatores operacionais não foram levados em consideração neste estudo. Não foi avaliado se houve uma perda parcial da carepa durante o carregamento dos cestões de sucata. Isto é possível dada à granulometria muito mais reduzida da carepa em relação à da sucata. Também não foi realizada análise da quantidade e da composição do pó captado pelo sistema de despoeiramento do FEA, a fim de prever, por exemplo, uma sucção de carepa a partir do quarto furo da abóbada do FEA. Da mesma forma, não foi objeto deste trabalho a análise da quantidade de escória vazada a partir do FEA. Estes fatores podem ter influência sobre os resultados de rendimento.

### 5.3.2.3 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os “*boxplots*” paralelos do comparativo do consumo de energia elétrica nas campanhas de teste, com e sem carepa, para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa são apresentados na figura 52.

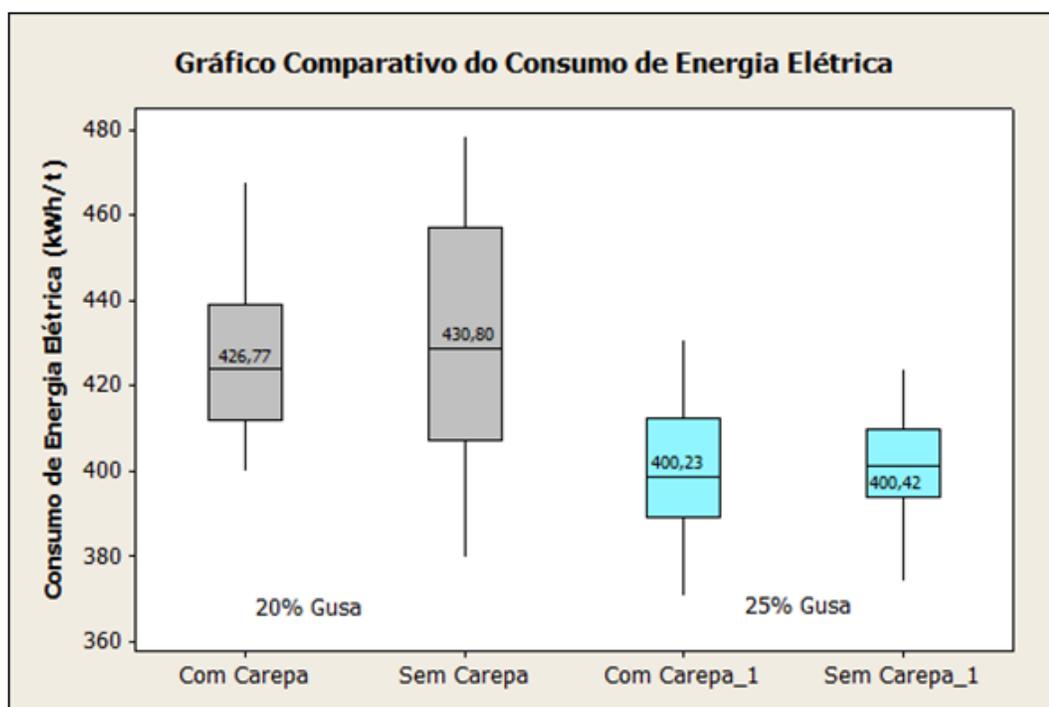


Figura 52 - “*Boxplots*” paralelos do comparativo do consumo de energia elétrica nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

Ao contrário da tendência estabelecida pela redução do rendimento metálico, o consumo de energia elétrica apresentou resultados satisfatórios. Segundo os resultados da figura 52, houve uma pequena redução no consumo de energia, aproximadamente 4kWh/t na campanha com carepa na condição de 20% de ferro-gusa na carga. Nesta mesma condição, é possível observar menor variabilidade nos valores encontrados em relação à campanha sem carepa. Já na condição de 25% de ferro-gusa, houve a manutenção dos valores médios, em torno de 400kWh/t, assim como a preservação da variabilidade dos valores encontrados nos experimentos. O fator F calculado para ambas campanhas, de 0,4330 e 0,0019, respectivamente para 20 e 25% de ferro-gusa, revelam um fator F muito menor do  $F_{\text{crítico}}$  de 4,04. Independente de qualquer análise matemática, a redução no consumo de qualquer tipo de energia em processos produtivos é extremamente importante, pois representa ganho direto. Em seus experimentos Neto (2009) fez previsão da elevação no consumo de energia elétrica associada à introdução de carepa no FEA, através de cálculos teóricos, o que não se confirmou neste trabalho.

Por outro lado, a otimização das quantidades de coque injetado poderá não somente melhorar o rendimento metálico, conforme hipótese já levantada anteriormente, mas também contribuir para se obter uma maior eficiência na formação da escória espumante e, assim, agregar os benefícios desta operação no processo de refino do aço, favorecendo, entre outros fatores, uma maior redução no consumo de energia elétrica.

De forma geral, a introdução da carepa no FEA não desencadeou uma necessidade energética adicional ao processo e, ainda mais, reduziu a variabilidade dos resultados, contribuindo para estabilização deste indicador. O aumento no consumo de energia elétrica observada na campanha com 20% de ferro-gusa se deve exclusivamente ao balanço energético inerente à menor oferta de carbono no banho líquido pela redução do carburante. Em seu trabalho, John (2009) demonstra a importância da geração de energia química a partir do carbono presente no ferro-gusa e seu efeito sobre a redução da energia elétrica.

### 5.3.2.4 AVALIAÇÃO DO TEOR DE FÓSFORO NO AÇO

Os “*boxplots*” paralelos do comparativo do teor de fósforo nas campanhas de teste, com e sem carepa, para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa são apresentados na figura 53.

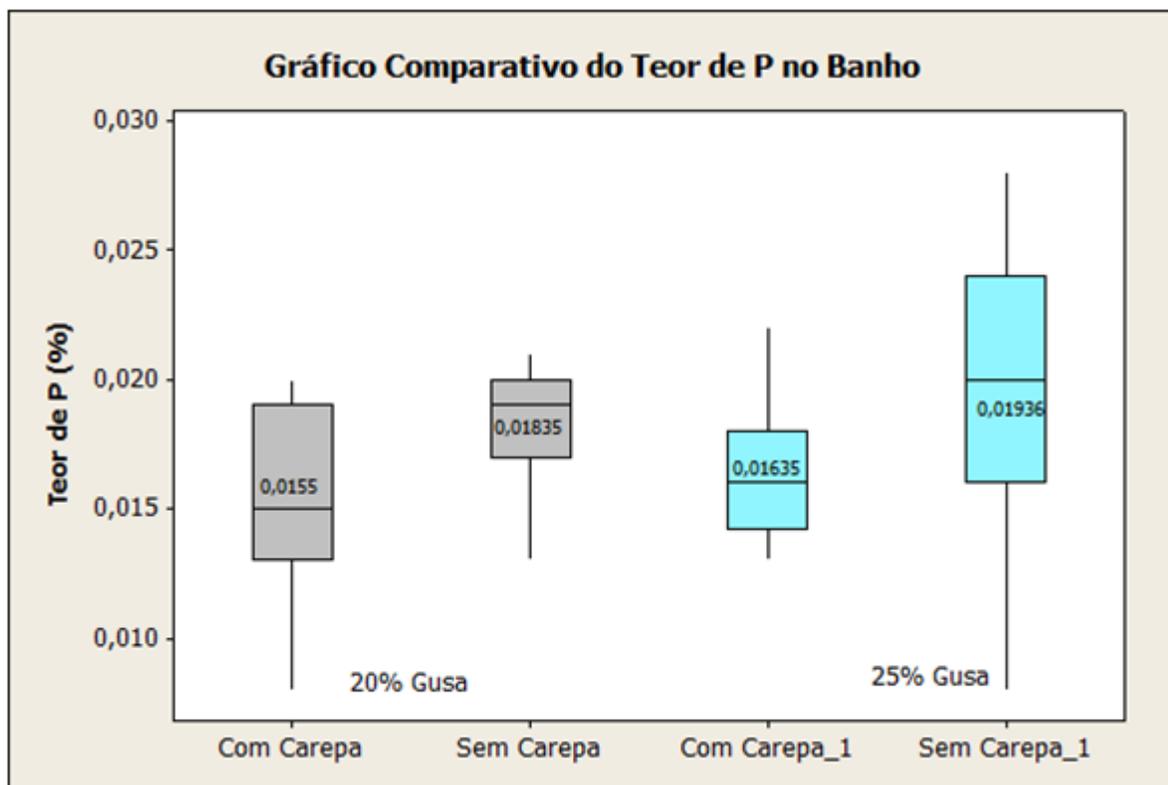


Figura 53 - “*Boxplots*” paralelos do comparativo da composição de fósforo nas campanhas de teste, com e sem carepa para as condições de 20 e 25% de ferro-gusa.

Os teores de fósforo das análises químicas reveladas na figura 53 evidenciam, de forma clara, uma tendência de redução do fósforo residual do aço nas campanhas com carepa. A redução da média alcançada foi sistemática e da ordem de 15%, tanto para a campanha de 20 como para 25% de ferro-gusa. Pode-se verificar que as médias foram sensivelmente reduzidas, e no caso da campanha com 25% de gusa com carepa, a variabilidade dos valores se tornou muito menor. A campanha de 20% de gusa com carepa, ao contrário, teve sua variabilidade ampliada, porém concentrando 75% dos valores de fósforo para uma faixa abaixo da média encontrada para as corridas sem

carepa. Este fato também é extremamente positivo. O  $F_{\text{crítico}}$  calculado para estes dados foi da ordem de 4 para ambas as campanhas de 20 e 25% de gusa. O fator F calculado para as campanhas de 20% e 25% de gusa foram 7,888 e 5,376, respectivamente, e portanto, comprovam estatisticamente que a carepa determinou a redução do fósforo residual no aço. Uma atenção especial deve ser dada à escolha do agente redutor, pois dependendo da sua qualidade, pode-se tornar uma fonte adicional de fósforo para o FEA, prejudicando os resultados (BUZIN, 2009).

O efeito benéfico obtido nas reações de desfosforação do aço líquido pode ser atribuído ao fato de que o FeO da carepa, ao fundir logo no primeiro carregamento, já formava certa quantidade de escória em contato com os primeiros volumes de aço líquido. Como neste momento da corrida a temperatura é relativamente baixa, tem-se condições termodinâmicas propícias às reações de desfosforação. Dessa forma, havendo disponibilidade de FeO desde a etapa de fusão, escória e aço obtiveram maior tempo para promover reações de desfosforação, as quais são fortemente dependentes do teor de FeO e de temperaturas não muito elevadas, características da fase de fusão. Esse efeito positivo sobre a desfosforação do aço líquido contribui para que se introduzam materiais metálicos menos nobres e mais atrativos em termos de custo na composição da carga do forno (NETO, 2009), sendo até então proibitivos sob pena de desclassificar corridas pelo seu alto teor fósforo.

## 6. CONCLUSÕES

Os diferentes tipos de carepa gerados na planta siderúrgica e caracterizados nesse estudo se distinguiram, essencialmente, quanto ao tamanho de partícula e quantidade de umidade. A análise granulométrica indicou que a parcela majoritária média de 80% das carepas denominadas grossas está acima de 0,25mm, enquanto que para as carepas finas, em média tem-se cerca de 35% do material com granulometria acima de 0,25mm. O teor de umidade encontrado para as carepas grossas estão entre 3 e 7%, ao passo que, para as carepas finas, a umidade variou de 18 a 20%. A carepa misturada, tal como ela é armazenada na usina, apresentou uma granulometria com 50% da sua massa inferior a 0,25mm e aproximadamente 6% de umidade. Estes dados direcionam a necessidade de promover uma drenagem mais eficiente do co-produto na área de estocagem da usina geradora, a fim de reduzir o teor de umidade presente na carepa. Os dados de granulometria devem ser levados em consideração caso o trabalho evolua para aplicação em aglomerados autorredutores.

Quimicamente, as amostras de carepa são bastante semelhantes, sendo constituídas principalmente por óxidos de ferro, essencialmente hematita, magnetita e wustita. Entre os óxidos encontrados na composição química desse material, a wustita merece destaque por prevalecer em quantidade para todas as carepas analisadas. O teor de ferro medido foi de no mínimo 70% para todas as carepas analisadas.

No ensaio isotérmico de autorredução à temperatura de 1300°C, realizado com “mini bag” de carepa e coque de petróleo misturados, atingiu-se elevados graus de metalização de 80 e 90%, em tempos relativamente curtos entre 10 a 15 minutos, respectivamente. Ficou comprovado de forma evidente nesse teste que tanto a temperatura, como o tempo têm influência expressiva na cinética das reações de redução dos óxidos contidos na carepa. Por outro lado, os resultados de autorredução obtidos a partir do aquecimento da carepa e agente redutor colocados de forma estratificada no “mini bag” não se mostraram satisfatórios, pois mesmo na temperatura de 1300°C, o máximo grau de metalização obtido foi de aproximadamente 10%.

Os ensaios não-isotérmicos de aquecimento rápido da mistura até a temperatura de 1500°C mostrou que, em apenas 8 minutos, a mistura autorredutora atingiu valores

acima de 90% de metalização. Através desses testes, verificou-se visivelmente diferentes estágios de amolecimento e fusão da amostra durante a redução dos óxidos de ferro.

Os ensaios de autorredução da carepa em laboratório evidenciam que a melhor alternativa de reciclagem deste resíduo poderá ser obtida através de “bags autorredutores”. As amostras de mistura homogênea de carepa e agente redutor produziram resultados satisfatórios quanto à fração reagida e grau metalização, tanto maior quanto mais alta temperatura de ensaio. Também o significativo teor de ferro contido nesse resíduo e a mistura íntima com agente redutor resultaram em uma elevada cinética de autorredução, fato verificado em alta temperatura próxima da operação do FEA (1500°C) nos ensaios de redução-fusão, favorecendo reciclagem da carepa via FEA. Por outro lado, o modelo de ensaios de autorredução com “mini bags” estratificados não apresentou resultados satisfatórios pelo baixo percentual de fração reagida e baixo grau de metalização.

Os resultados dos testes industriais com adição de 1% de carepa no forno elétrico a arco comprovaram de forma prática e estatística que não houve influência sobre o consumo de energia elétrica e sobre o teor de FeO da escória. Os prognósticos negativos inicialmente esperados não se confirmaram. Com a introdução de 1% de carepa na carga do forno, o indicador de rendimento metálico sofreu impacto negativo, sendo reduzido em média 1,4%, ainda que o grau de significância F calculado não tenha caracterizado variância significativa atrelada ao uso da carepa nos testes industriais. A relação teórica entre o rendimento e suas variáveis dependentes demonstra que é possível obter melhores resultados com aumento do coque de petróleo injetado no forno, desde que se mantenham inalterados os níveis de FeO e injeção de oxigênio. Além disso, elementos não estudados nesta ocasião como pó de exaustão e escória vazada necessitam ser avaliados para se comprovar seus efeitos sobre o rendimento.

A introdução de 1% de carepa no forno elétrico trouxe resultados significativos no processo de desfosforação, onde os valores médios do percentual de fósforo das corridas foram reduzidos em cerca de 15%, com a utilização de carepa. Este indicador, se analisado de forma isolada, e amparado pela análise estatística do grau de

significância, oferece um forte argumento para reciclagem da carepa, pois, além de melhorar a qualidade intrínseca do aço produzido, pode ser uma alternativa interessante para redução de custo no emprego metálico global do processo.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

Realizar testes práticos no forno elétrico a arco variando-se as quantidades de injeção de coque de petróleo, a fim de evidenciar os possíveis ganhos no rendimento metálico do processo. Uma análise de custo deverá ser conduzida para subsidiar os resultados práticos. Da mesma forma, deve ser investigada a correlação entre a composição e quantidades do pó de exaustão e escória vazada no FEA e sua influência sobre os resultados de rendimento metálico, assim como também a evolução da composição química da escória durante o processamento do aço. Uma melhor caracterização do fundo úmido se faz necessário para compreensão dos fenômenos relacionados ao rendimento metálico.

Validar os ensaios laboratoriais de redução promovidos neste trabalho através de testes práticos no forno elétrico a arco, introduzindo no reator uma mistura autorredutora homogênea de carepa e coque de petróleo, seja através de “mini bags” ou de qualquer meio semelhante.

Este trabalho não contemplou análise de porosidade da carepa, entretanto, este é um fator relevante que deve ser investigado em laboratório, visto que uma maior área superficial de contato favorece as reações de redução.

Verificar evolução e o comportamento das fases dos óxidos de ferro nos ensaios de autorredução em laboratório para os tempos de 5, 10 e 15min. Através das análises de raios-X e espectroscopia Mössbauer, será possível determinar quais óxidos da carepa deverão ser reduzidos e em que proporção, principalmente o comportamento da wustita nos diferentes tempos de ensaio.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLFI, J.; EKMAN, T.; VON SCHÉELE, J.; BLASIAK, W. *Scale formation and surface quality of carbon steel at oxyfuel heating*. Steel Rolling, Paris 2006.

ÁVILA, T.A. *Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço*, Belo Horizonte: UFMG, 2011. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), Universidade Federal de Minas Gerais.

ARAÚJO, L.A. *Manual de Siderurgia, vol 1 – produção*. Editora Arte & Ciência, São Paulo, 1997, 470 pg.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. *Resíduos Sólidos - Classificação*, 71 pg, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007. *Amostragem de Resíduos Sólidos*, 21 pg, Rio de Janeiro, 2004.

BAGATINI, M. C. *Estudo da Reciclagem da Carepa através do Uso de Briquetes Autorredutores em Fornos Elétrico a Arco*, Porto Alegre: UFRGS, 2011. Tese (Doutorado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BALAJEE, S. R., CALLAWAY P. E., KEILMAN L. M. *Production and BOF Recycling of Waste Oxide Briquettes Containing Steelmaking Sludges, Grit, and Scale at Inland Steel*, Steelmaking Conference Proceedings, p. 51-65, 1995.

BRUCH, R. *Otimização do ciclo de painéis através do estudo de perdas térmicas em aciarias elétricas*, Porto Alegre: UFRGS, 2012. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FLORES, B. D. *Estudo da Redução-Fusão de Misturas Autorredutoras de Carepa e Coque de Petróleo com Vistas à Utilização em Fornos Elétricos a Arco*, Porto Alegre: UFRGS, 2011. Trabalho de diplomação, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BUZIN, P. J. W. K. *Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco*, Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAMPOS, V. F. *Tecnologia de fabricação do aço líquido*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1985. V. 1: Fundamentos.

CHEVRAND, L. J. S. *Aciaria Elétrica*. São Paulo: ABM, 2007.

CODA, R. C. *Laminação: Produtos Longos de Aço Laminados a Quente*. Laboratório de Transformação Mecânica. UFRGS, 2007.

CUNHA A. F. et al. *Aspectos Técnicos da Utilização da Carepa Gerada em processos Siderúrgicos e Tratada por Desagregação Ultra-Sônica*, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v. 3, p. 1-5, 2006.

DANILOV, E.V. *Economical Method of Recycling Metallurgical and Mill Scale by the Sifter Technology in an Arc Steelmaking Furnace*, in Metallurgist, vol. 47, nos. 5, pg. 49-50, may 2003, New York.

DEAN K. C.; HAVEN R.; VALDEZ E. G. *Agglomeration as in Treating Waste Materials*, Proceeding Institute for Briquetting Agglomeration, v. 13, p. 23-36, 1973.

DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. 3. ed. Singapore. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, 1988.

DNIT-EM 262/94 – *Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários* – Rio de Janeiro RJ, 4p., 1994.

DNIT-PRO 263/94 – *Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários* - Rio de Janeiro, RJ, 3p., 1994.

DNER-ES 313/97 - *Pavimentação – concreto betuminoso* - Rio de Janeiro, RJ, 16 p., 1997.

DONALD, J.R.; PICKLES, C.A. *Reduction of electric arc furnace dust with solid iron powder*. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 35, n. 3, p. 255-267, 1996.

FERREIRA, A.B.H., *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*, 1ª edição, Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1982.

FIGUEIRA, R. M. F. *Operação de Forno Elétrico a Arco*. São Paulo: Gerdau, 2007.

GEYER, R.M.T. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*, Porto alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GUIMARÃES, R.C.; SARFIELD, C.J.A. *Estatística*, 2ª edição, McGraw-Hill, 2007.

GODINSKII, N. A. et al. *Use of iron-carbon-bearing briquets in electric steelmaking*. Metallurgist, v. 47, n. 1-2, p. 16-19, Jan-Feb 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, Anuário Estatístico, Rio de Janeiro, 2011.

JIE, S. et al. *Reduction of oxide scale on hot-rolled strip steels by carbon monoxide*, Materials Letters, v. 62, p. 3500-3502, 2008.

JOHN, A.L. *Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco*, Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. *Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil*. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, 2000, São Paulo. Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo: SEMA-SP/FIESP/CETESB, 2000.

KOROS, P.J. *Dusts, scale, slags, sludges ... Not wastes, but sources of profits*, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 34B, p. 769 – 779, December 2003.

LOPES, M. F. *Caracterização de Carepas de Laminação com Vistas a Reciclagem no Forno Elétrico a Arco*, Porto Alegre: UFRGS, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LÚCIO, A. *Físico Química Metalúrgica*, vol 1, UFMG, Belo Horizonte, 1980, 340 pg.

LÚCIO, A. *Físico-química Metalúrgica – Segunda Parte*, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica, 1981.

MARTINS, K.M.; D'ABREU, J.C.; NOLDIN, J.H. *Aspectos morfológicos e teor de carbono do ferro metálico gerado na redução de briquetes autorredutores*, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.2, n. 2, p. 1-5, dez. 2005.

MASUERO, A. B. *Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento*. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 285p. (Tese de Doutorado em Engenharia).

MOURA, W. A. *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 273p. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil).

MOURÃO M. B. et al. *Introdução à Siderurgia*, Associação Brasileira de metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo, 2007.

NETO, R.T. *Utilização da Carepa em Forno Elétrico a Arco*, Curitiba: FEI, 2009. Trabalho de Conclusão de Curso, Programa de Pós Graduação em Metalurgia, Centro Universitário da FEI.

NOLDIN, J. H., *Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores*, Rio de Janeiro, 2002. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), DCMM, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

NOLDIN JÚNIOR J. H.; BENTES M. A. G.; D'ABREU J. C.; ROSSI L. A.; LEITE A. B. *Recycling of CST By-products by Tecno-red Ironmaking*, Technical Contribution to the 2nd International Meeting on Ironmaking, Theme "Environment / wastes recycling", 12 a 15 de setembro de 2004, Vitória, ES, Brasil.

OLIVEIRA, L.C.P. *Panorama da Gestão de resíduos – Evolução e tendências*, in: *Workshop de gerenciamento de resíduos sólidos no setor minero - metalúrgico*, Nov/2004, disponível em: [http://www.abmbrasil.com.br./cim/download/ Panorama\\_da\\_Gestão\\_Resíduos.pps](http://www.abmbrasil.com.br./cim/download/ Panorama_da_Gestão_Resíduos.pps).

REIS, W. L. C. *Otimização da Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos por Redução Carbotérmica*, São Carlos: UFSCAR, 2008. Tese, Programa de Pós-graduação em Ciências em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

RIZZO, E. M. S., *Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco* – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, São Paulo, 2006.

ROCHA, B. P., *Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco*, Rio de Janeiro: UFRJ, 2011. Trabalho de diplomação, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RODRIGUES, R.A. *Comparativo entre o fio-máquina produzido com aço SAE 1005 e SAE 1405 modificados para produção de arames recozidos*. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROSS, H.U.; McADAMS, D.; MARSHALL, T. *Physical Chemistry in: – Direct Reduction Iron – Technology and economics of production and use*, Iron Steel Society of AIME, 1980, chapter 3, physical Chemistry, pgs 9-34.

SANDBERG, E. *Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data*. Lulea University of Technology Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Process Metallurgy, 2005.

SAKAMOTO, Y. et al. *Estimation of Energy Consumption for Each Process in the Japanese Steel Industry: a Process Analysis*. Japan: Energy Conversion & Management 40, 1999, p. 1129-1140.

SILVA, A.B. *Caracterização do escoamento em um distribuidor de lingotamento contínuo com a técnica de planos laser*, Porto Alegre: UFRGS, 2003. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, R.C.P. et al. *Análise Comparativa da Reciclagem da Escória de Alto-Forno no Concreto Armado*. X Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão (JEPEX 2010), UFRPE, 2010.

STORY, S.R.; SARMA, B.; FRUEHAN, R.J.; CRAMB, A.W.; BELTON, G.R. *Reduction of FeO in smelting slags by solid carbon: Re-examination of the influence of the gas-carbon reaction*, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Volume 29, Issue 4, p. 929 – 932, August 1998.

STUART, C. *Zinc Recycling Minimises Wastes*. In: REWAS`99: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, p.1287-1296, San Sebastian, Espanha, 1999.

TAKANO, C.; DEODORO, J. T. C.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; LENZ, G.; MARTINS, D. S. *A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos*. In: Seminário Nacional sobre Reuso/reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, 2000, São Paulo. São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, 2000.

TARCIZO, A. *Gestão de Resíduos portadores de Ferro e Carbono*, 2008, in: 2º Workshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro, disponível em:[http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327\\_2workshopagregado\\_AndreTarcizo.pdf](http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_AndreTarcizo.pdf).

TAVARES, D.S. *Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico*, Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UMADEVI T., KUMAR M. G. S., MAHAPATRA P. C., BABU T. M AND RANJAN M. *Recycling of steel plant mill scale via iron ore pelletisation process*, *Ironmaking and Steelmaking*, v. 36, n. 6, p. 409 - 415, 2009.

VARGAS, A. S. *Estudo da Viabilidade do uso do Pó de Aciaria Elétrica a Arco na confecção de Blocos de Concreto para Pavimentação*, Porto Alegre: UFRGS, 2002. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VELLOSO, C.M. *Otimização do alto-forno 1 da V&M do Brasil com “Stave Cooler” através da distribuição de carga no topo do forno*, Belo Horizonte: UFMG, 2006. Dissertação (Mestrado em Metalurgia), Universidade Federal de Minas Gerais.

VON KRÜGER, P. *Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia*. *Metalurgia & Materiais*, p.116-119, fev. 1995.

## 9. ANEXOS

### 9.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS INDICADORES DOS TESTES NO FEA

#### INJEÇÃO DE OXIGÊNIO

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

##### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	28	342,7948672	12,24267383	0,33069275
Coluna 2	26	306,5395406	11,78998233	0,84404221

##### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	2,7627545	1	2,7627545	4,78402878	0,033244905	4,026631222
Dentro dos grupos	30,02975953	52	0,577495376			
Total	32,79251403	53				

#### INJEÇÃO DE OXIGÊNIO

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

##### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	29	465,6504397	16,05691172	1,23230991
Coluna 2	23	369,6371538	16,0711806	0,99000336

##### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	0,002611575	1	0,002611575	0,00231997	0,961775806	4,034309546
Dentro dos grupos	56,2847515	50	1,12569503			
Total	56,28736307	51				

#### INJEÇÃO DE COQUE

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

##### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	28	50,07899255	1,788535448	0,12995184
Coluna 2	26	51,32361648	1,973985249	0,16291501

##### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	0,463650104	1	0,463650104	3,18005233	0,080379204	4,026631222
Dentro dos grupos	7,581575067	52	0,145799521			
Total	8,045225171	53				

#### INJEÇÃO DE COQUE

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

##### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	29	61,49799075	2,120620371	0,27195801
Coluna 2	23	55,71940872	2,422582988	0,17645535

##### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	1,169577087	1	1,169577087	5,08651457	0,028521066	4,034309546
Dentro dos grupos	11,496842	50	0,22993684			
Total	12,66641909	51				

**ENERGIA**

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	28	11947,18986	426,6853522	264,939303
Coluna 2	24	10339,35945	430,8066438	790,884415

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	219,4990376	1	219,4990376	0,43304453	0,513517416	4,034309546
Dentro dos grupos	25343,70273	50	506,8740545			
Total	25563,20176	51				

**ENERGIA**

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	26	10405,93336	400,228206	240,949466
Coluna 2	23	9209,751923	400,4239967	226,603613

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	0,467831105	1	0,467831105	0,00199728	0,964543019	4,047099759
Dentro dos grupos	11009,01613	47	234,2343858			
Total	11009,48396	48				

**RENDIMENTO**

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	28	2513,610536	89,77180487	15,4539541
Coluna 2	24	2200,651249	91,69380202	31,3329814

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	47,73879036	1	47,73879036	2,09764246	0,153768749	4,034309546
Dentro dos grupos	1137,915332	50	22,75830664			
Total	1185,654122	51				

**RENDIMENTO**

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	29	2666,448053	91,94648459	12,4280888
Coluna 2	23	2136,192456	92,87793286	13,9017948

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	11,12858549	1	11,12858549	0,85103574	0,360689825	4,034309546
Dentro dos grupos	653,8259736	50	13,07651947			
Total	664,954559	51				

**TEOR DE FÓSFORO**

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	26	0,403	0,0155	0,00001018
Coluna 2	23	0,422	0,018347826	1,5237E-05

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,89765E-05	1	9,89765E-05	7,88834605	0,007225434	4,047099759
Dentro dos grupos	0,000589717	47	1,25472E-05			
Total	0,000688694	48				

**TEOR DE FÓSFORO**

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	20	0,327	0,01635	6,8711E-06
Coluna 2	19	0,368	0,019368421	2,669E-05

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,87725E-05	1	8,87725E-05	5,37600572	0,026045723	4,105455834
Dentro dos grupos	0,000610971	37	1,65127E-05			
Total	0,000699744	38				

**TEOR DE FeO**

Gusa 20% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	27	697,5	25,83333333	8,23923077
Coluna 2	25	707,7	28,308	34,5757667

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	79,49390769	1	79,49390769	3,80703946	0,05665198	4,034309546
Dentro dos grupos	1044,0384	50	20,880768			
Total	1123,532308	51				

**TEOR DE FeO**

Gusa 25% / com 1% de carepa / sem carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	26	786,2	30,23846154	13,7760615
Coluna 2	18	540,1	30,00555556	15,5393791

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,576971639	1	0,576971639	0,0398192	0,842797487	4,072653663
Dentro dos grupos	608,5709829	42	14,48978531			
Total	609,1479545	43				

**TEOR DE FeO**

Gusa 25% e 20% / com 1% de carepa

**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	27	697,5	25,83333333	8,23923077
Coluna 2	26	786,2	30,23846154	13,7760615

**ANOVA**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	257,0267634	1	257,0267634	23,4655559	1,22642E-05	4,030392426
Dentro dos grupos	558,6215385	51	10,9533635			
Total	815,6483019	52				

## 9.2. DIFRATOGRAMAS COMPLEMENTARES DAS CAREPAS (LF=laminação fina; LG=laminação grossa; CM=carepa misturada)

