

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**ANDRÉ LUÍS DE BRITO BAPTÍSTA**

***DESENVOLVIMENTO DE UM BRIQUETE AUTO-FUNDENTE,  
MULTICONSTITUIDO DE REJEITOS, RESÍDUOS E DESCARTES  
RECICLÁVEIS GERADOS NA PLANTA INTEGRADA DE PRODUÇÃO  
DE AÇO, APLICADO COMO COMPONENTE DA CARGA DE FORNOS  
DE REDUÇÃO DE FERRO***

**VOLTA REDONDA**

**2016**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

***DESENVOLVIMENTO DE UM BRIQUETE AUTO-FUNDENTE,  
MULTICONSTITUIDO DE REJEITOS, RESÍDUOS E DESCARTES RECICLÁVEIS  
GERADOS NA PLANTA INTEGRADA DE PRODUÇÃO DE AÇO, APLICADO  
COMO COMPONENTE DA CARGA DE FORNOS DE REDUÇÃO DE FERRO***

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do Título de Mestre em Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho, na área de concentração de processamento e reciclagem de materiais, linha de pesquisa em materiais compósitos.

Aluno:

André Luís de Brito Baptista

Orientador:

Prof. Dr. Luiz de Araujo Bicalho

Coorientador :

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

**VOLTA REDONDA**

**2016**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

B222d Baptista, André Luís de Brito.

Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos de redução de ferro. / André Luís de Brito Baptista. - Volta Redonda: UniFOA, 2016.195p.: II

Orientador(a): Profº. Dr. Luiz de Araujo Bicalho

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. Brinquetagem. 3. Briquete. 4. Auto-redutor. I. Bicalho, Luiz de Araujo. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Programa de Pós-Graduação **Stricto Sensu** em Materiais

Dissertação de Mestrado

**Aluno: André Luis de Brito Baptista**

**DESENVOLVIMENTO DE UM BRIQUETE AUTO-FUNDENTE,  
MULTICONSTITUÍDO DE REJEITOS, RESÍDUOS E DESCARTES RECICLÁVEIS  
GERADOS NA PLANTA INTEGRADA DE PRODUÇÃO DE AÇO, APLICADO  
COMO COMPONENTE DA CARGA DE FORNOS DE REDUÇÃO DE FERRO**

Orientador:

Prof. Dr. Luiz de Araujo Bicalho

Coorientador :

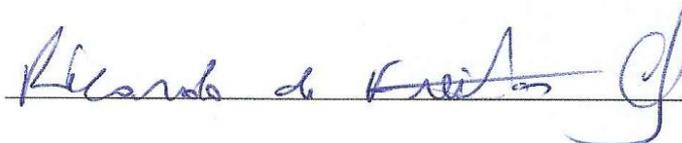
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Banca Examinadora



---

Prof. Dr. Luiz de Araujo Bicalho – Memat Unifoa



---

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral – Memat Unifoa



---

Prof. Dr. Wesley Luiz da Silva Assis

Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda- UFF

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 - INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                                           | 17 |
| <b>2 - OBJETIVO GERAL :</b>                                                                                                                                     | 22 |
| <b>2.1 - OBJETIVO ESPECÍFICOS :</b>                                                                                                                             | 22 |
| <b>3 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA</b>                                                                                                                              | 22 |
| <b>3.1 - AGLOMERAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS : BRIQUETAGEM</b>                                                                                                       | 25 |
| 3.1.1 – Briquete : Um material compósito                                                                                                                        | 25 |
| 3.1.2 - Relação entre resistência mecânica dos briquetes e aplicação industrial siderúrgica (Abordagem através dos conceitos de ciências dos materiais)         | 34 |
| 3.1.3 - Briquetagem                                                                                                                                             | 37 |
| 3.1.3.1 - Briquetagem com Aglomerantes/Aglutinantes (ou Ligantes)                                                                                               | 39 |
| 3.1.3.2 - Consideração sobre a utilização de ligantes                                                                                                           | 39 |
| 3.1.3.3 - Requisitos principais de um aglomerante                                                                                                               | 40 |
| 3.1.3.4 - Divisão e Classificação de aglomerantes                                                                                                               | 40 |
| 3.1.3.5 - Aglomerantes usados em briquetagem                                                                                                                    | 41 |
| 3.1.3.6 - Uso da escória de aciaria como aglomerante (co-produto)                                                                                               | 45 |
| 3.1.3.6.1 - Fatores que determinam o uso da escória de aciaria como aglomerante: Composição Química, Reatividade Química, Atividade Pozolanica e Hidraulicidade | 49 |
| 3.1.3.7 - O Processo de Briquetagem (Compactação)                                                                                                               | 56 |
| 3.1.3.8 - Etapas do Processo de Briquetagem                                                                                                                     | 56 |
| 3.1.3.9 - Aspecto Físico e Dimensões dos Briquetes                                                                                                              | 57 |
| <b>3.2 - EXIGÊNCIAS PARA APLICAÇÃO DE BRIQUETES EM FORNOS SIDERÚRGICOS</b>                                                                                      | 58 |
| 3.2.1 - Classificação e Escolha da Matéria Prima                                                                                                                | 58 |
| 3.2.2 - Avaliação da qualidade dos briquetes                                                                                                                    | 61 |
| 3.2.3 - Fatores que afetam as propriedades metalúrgicas de aglomerados a                                                                                        | 66 |

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| frio de minério de ferro                                                                                |            |
| 3.2.3.1 - Qualidade Física                                                                              | 66         |
| 3.2.3.2 - Resistência dos briquetes                                                                     | 66         |
| 3.2.3.3 - O alto-forno e a carga metálica<br>(matérias-primas carregadas no topo)                       | 66         |
| <b>3.3 - VANTAGENS DO USO DE BRIQUETES PARA INTRODUÇÃO DE FINOS<br/>EM INSTALAÇÕES METALÚRGICAS</b>     | <b>70</b>  |
| 3.3.1 - Vantagens dos briquetes                                                                         | 71         |
| <b>3.4 - VISÃO DE MERCADO: JUSTIFICATIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO<br/>DOS BRIQUETES</b>                  | <b>73</b>  |
| <b>3.5 - COMO É UTILIZADO O BRIQUETE NAS INSTALAÇÕES METALÚRGICAS<br/>DE PRODUÇÃO DE FERRO E AÇO</b>    | <b>85</b>  |
| <b>3.6 - EQUIPAMENTOS SIDERÚRGICOS QUE PODEM UTILIZAR BRIQUETES<br/>EM SUA CARGA</b>                    | <b>91</b>  |
| 3.6.1 - Utilização de briquetes de Combustível e de Minério em Alto-Forno<br>a Coque e a Carvão Vegetal | 92         |
| <b>3.7 - IMPACTOS AMBIENTAIS DO USO DE BRIQUETES</b>                                                    | <b>109</b> |
| <b>3.8 - IMPACTOS ECONÔMICOS DO USO DE BRIQUETES</b>                                                    | <b>123</b> |
| 3.8.1 - Custos Logísticos                                                                               | 137        |
| <b>4 - MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                                          | <b>140</b> |
| <b>5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                                                                       | <b>147</b> |
| <b>6 – CONCLUSÕES</b>                                                                                   | <b>168</b> |
| <b>7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>                                                               | <b>170</b> |
| <b>8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                                                   | <b>171</b> |

## LISTA de FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                    | Pág.; |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Figura 1</b> Classificação dos tipos de compósitos                                                                                                                                                              | 30    |
| <b>Figura 2</b> Exemplos de compostos reforçados                                                                                                                                                                   | 31    |
| <b>Figura 3</b> Esquematização da composição de um aglomerado                                                                                                                                                      | 31    |
| <b>Figura 4</b> Aumento da resistência pela refinamento da estrutura                                                                                                                                               | 32    |
| <b>Figura 5</b> Redução da concentração dos poros na massa briquetada devido à variação no tamanho de grãos                                                                                                        | 33    |
| <b>Figura 6</b> Representação esquemática do efeito “Filler”                                                                                                                                                       | 33    |
| <b>Figura 7</b> Fatores que dependem as propriedades dos compósitos                                                                                                                                                | 34    |
| <b>Figura 8</b> Classificação segundo sua fase dispersa : particulado ou reforço por fibras                                                                                                                        | 34    |
| <b>Figura 9</b> Disposição dos reforços em materiais minerais ou cerâmicos                                                                                                                                         | 35    |
| <b>Figura 10</b> Tipos de partículas esféricas e floculares                                                                                                                                                        | 36    |
| <b>Figura 11</b> Grau de circularidade das partículas esféricas e floculares                                                                                                                                       | 36    |
| <b>Figura 12</b> Morfologia das partículas esféricas e floculares                                                                                                                                                  | 37    |
| <b>Figura 13</b> Distribuição de material em um aglomerado                                                                                                                                                         | 37    |
| <b>Figura 14</b> Relação de DeHoff entre estrutura, processo e propriedade dos materiais.                                                                                                                          | 39    |
| <b>Figura 14</b> Processo de Desenvolvimento de Produto                                                                                                                                                            | 39    |
| <b>Figura 16</b> Mecanismos de ligações na aglomeração. <b>(a)</b> fusão parcial das partículas, <b>(b)</b> reação química, <b>(c)</b> pontes líquidas, <b>(d)</b> forças moleculares; <b>(e)</b> forças capilares | 44    |
| <b>Figura 17</b> Classificação dos aglomerantes                                                                                                                                                                    | 44    |
| <b>Figura 18</b> Materiais usados em processos de aglomeração a frio na metalurgia                                                                                                                                 | 45    |

|                  |                                                                                                                                              |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 19</b> | Participação no Custo Final do Aço                                                                                                           | 48 |
| <b>Figura 20</b> | Resistência de briquetes com cal hidratada como aglomerante moldados sem pressão, em função da relação água/cal                              | 48 |
| <b>Figura 21</b> | Resistência à compressão dos briquetes aglomerados com cal hidratada, curados ao ar, moldados com pressão relação Água/Cal = 0,15            | 49 |
| <b>Figura 22</b> | Aplicações diversas da escória de aciaria                                                                                                    | 50 |
| <b>Figura 23</b> | Uso correntes e usos potenciais da escória de aciaria de acordo com o resfriamento empregado                                                 | 50 |
| <b>Figura 24</b> | Diagrama ternário CaO-SiO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , com as faixas composicionais do cimento Portland e materiais afins | 51 |
| <b>Figura 25</b> | Fluxograma da metodologia industrial de confecção dos briquetes                                                                              | 61 |
| <b>Figura 26</b> | Formas de briquetes                                                                                                                          | 61 |
| <b>Figura 27</b> | – Os três grandes grupos de materiais                                                                                                        | 63 |
| <b>Figura 28</b> | - Evolução dos materiais utilizados na fabricação de componentes                                                                             | 63 |
| <b>Figura 29</b> | Formas de fontes de ferro sólidas                                                                                                            | 64 |
| <b>Figura 30</b> | Força impulsora de um alto forno                                                                                                             | 66 |
| <b>Figura 31</b> | Modos de fratura de aglomerados a frio tipo briquetes                                                                                        | 70 |
| <b>Figura 32</b> | Divisão esquemática do alto-forno em zonas de reação                                                                                         | 71 |
| <b>Figura 33</b> | Elementos de competitividade na siderurgia                                                                                                   | 83 |
| <b>Figura 34</b> | Demonstrativo do estoque de minerais                                                                                                         | 84 |
| <b>Figura 35</b> | Evolução do padrão (modelo mundial) e consumo de matéria-prima                                                                               | 85 |
| <b>Figura 36</b> | Aumento do uso de minério para produção da tonelada de aço                                                                                   | 85 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 37</b> Novas Tecnologias de produção de ferro primário                                                 | 86  |
| <b>Figura 38</b> Classificação dos processos alternativos à luz das matérias primas (carbonosas e ferrosas)      | 87  |
| <b>Figura 39</b> Mecanismo proposto para a auto-redução de aglomerados                                           | 90  |
| <b>Figura 40</b> Etapas da auto-redução                                                                          | 91  |
| <b>Figura 41</b> Curva limite da fusão de aglomerados auto-redutores e sua separação da escória no diagrama Fe-C | 92  |
| <b>Figura 42</b> Carbono necessário à redução em função da temperatura                                           | 92  |
| <b>Figura 43</b> Parâmetros operacionais do processo em AF                                                       | 93  |
| <b>Figura 44</b> - Principais resultados no processo de redução (balanço material)                               | 94  |
| <b>Figura 45</b> - Emprego de briquetes em fornos de redução                                                     | 96  |
| <b>Figura 46</b> Produtividade AF                                                                                | 97  |
| <b>Figura 47</b> % de Si no gusa                                                                                 | 97  |
| <b>Figura 48</b> Consumo de redutor granulado                                                                    | 98  |
| <b>Figura 49</b> Consumo de sínter                                                                               | 98  |
| <b>Figura 50</b> Volume de escória                                                                               | 98  |
| <b>Figura 51</b> Basicidade da escória                                                                           | 98  |
| <b>Figura 52</b> Variação do produto de solubilidade do sulfeto de manganês (MnS)                                | 100 |
| <b>Figura 53</b> Distribuição da área das inclusões de MnS em material fundido                                   | 101 |
| <b>Figura 54</b> Influência do teor de enxofre na resistência do aço para tubos                                  | 101 |

|                  |                                                                                                                                           |     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 55</b> | Distribuição do fósforo por matéria-prima empregada na siderurgia                                                                         | 103 |
| <b>Figura 56</b> | Custos em alto-forno a carvão vegetal                                                                                                     | 104 |
| <b>Figura 57</b> | Valor equivalente entre minério, gusa e aço                                                                                               | 106 |
| <b>Figura 58</b> | Comparação dos custos de alto-forno a carvão vegetal e a coque                                                                            | 106 |
| <b>Figura 59</b> | Ilustração da unidade de fusão Oxycup                                                                                                     | 109 |
| <b>Figura 60</b> | Composição e reações de auto-redução em briquete tipo C                                                                                   | 110 |
| <b>Figura 61</b> | Distribuição de matérias-primas alimentadas no forno Oxycup                                                                               | 111 |
| <b>Figura 62</b> | Faixa de temperatura e de tempo para a redução do FeO, no briquete tipo C                                                                 | 111 |
| <b>Figura 63</b> | Conceito de rejeito zero para uma usina siderúrgica integrada típica operando com Oxycup                                                  | 112 |
| <b>Figura 64</b> | Fluxos de material e transporte dos gases para a co-geração de energia                                                                    | 112 |
| <b>Figura 65</b> | Representação ilustrada do trabalho conjunto do Oxycup alimentando o forno a arco em uma mini-usina                                       | 113 |
| <b>Figura 66</b> | Fluxograma da produção de tubos centrifugados partindo-se do metal primário produzido em forno OxiCup utilizando-se de briquetes na carga | 114 |
| <b>Figura 67</b> | Energia consumida por processos de produção de aço com o uso de briquetes                                                                 | 115 |
| <b>Figura 68</b> | Energia consumida na cadeia siderúrgica de fabricação de aço com e sem briquetes                                                          | 115 |
| <b>Figura 69</b> | Diagrama de Ashby mostrando a relação entre os preços dos diversos materiais de engenharia as suas frações recicladas.                    | 117 |

|                  |                                                                                                                                                                                        |     |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 70</b> | Contribuição média de cada substância (na produção de finos)                                                                                                                           | 117 |
| <b>Figura 71</b> | Índice de reciclagem/recirculação por tipologias de minérios                                                                                                                           | 118 |
| <b>Figura 72</b> | Emissões de CO <sub>2</sub> supondo o consumo de apenas um combustível (em 10 <sup>6</sup> t de CO <sub>2</sub> ).                                                                     | 120 |
| <b>Figura 73</b> | Emissões totais de CO <sub>2</sub> supondo substituição de dois combustíveis sólidos (em 10 <sup>6</sup> t de CO <sub>2</sub> )                                                        | 120 |
| <b>Figura 74</b> | Taxa de emissão de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) nas siderúrgicas do mundo em Kg CO <sub>2</sub> /T aço líquido, Brasil, Japão e Canadá empregam briquetes na carga dos fornos | 121 |
| <b>Figura 75</b> | Resultados obtidos com a utilização de briquetes em Alto-Forno Geração volumétrica de escoria em cada cenário de operação                                                              | 121 |
| <b>Figura 76</b> | Desempenho ambiental do alto-forno com o uso de matéria prima reciclada na forma de briquetes                                                                                          | 122 |
| <b>Figura 77</b> | Emissão de dioxinas e furanos por fonte geradora                                                                                                                                       | 123 |
| <b>Figura 78</b> | Redução de resíduos sólidos com a reciclagem de material rico em ferro (briquetes)                                                                                                     | 124 |
| <b>Figura 79</b> | Redução no consumo de recursos naturais com a reciclagem                                                                                                                               | 124 |
| <b>Figura 80</b> | Impactos ambientais do uso de briquetes correspondentes a usinas integradas e semi-integradas                                                                                          | 126 |
| <b>Figura 81</b> | Resultado da performance ambiental de processos que utilizaram briquetes na carga                                                                                                      | 126 |
| <b>Figura 82</b> | Participação da matéria prima na cadeia siderúrgica                                                                                                                                    | 127 |
| <b>Figura 83</b> | Consumo de matéria prima para produção de ferro e aço                                                                                                                                  | 128 |
| <b>Figura 84</b> | Transferência dos custos na produção do aço para a matéria prima                                                                                                                       | 128 |

|                   |                                                                                                                    |     |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 85</b>  | Estrutura de custos do setor siderúrgico em geral                                                                  | 129 |
| <b>Figura 86</b>  | Exemplo de estrutura de custos de siderúrgica brasileira com mina própria                                          | 129 |
| <b>Figura 87</b>  | Comparativo da evolução do custo de produção do ferro e aço versus o uso de briquetes na carga                     | 130 |
| <b>Figura 88</b>  | Comparação dos custos de produção do gusa entre os altos-fornos a coque e a carvão vegetal quando se usa briquetes | 130 |
| <b>Figura 89</b>  | Peso do gusa no custo da aciaria                                                                                   | 132 |
| <b>Figura 90</b>  | - Impacto da carga metálica no custo final do produto                                                              | 132 |
| <b>Figura 91</b>  | Cenários de custos com a utilização de briquetes em fornos Oxi-cup.                                                | 133 |
| <b>Figura 92</b>  | Consumo de energia na produção de vários metais                                                                    | 134 |
| <b>Figura 93</b>  | Consumo final energético – Ferro-gusa e Aço                                                                        | 135 |
| <b>Figura 94</b>  | - Consumo energético do setor ferro-gusa e aço (média histórica)                                                   | 135 |
| <b>Figura 95</b>  | Tipos de gastos na fabricação de produtos siderúrgicos tendo como destaque a energia elétrica                      | 136 |
| <b>Figura 96</b>  | - Consumo de energia em um alto-forno                                                                              | 137 |
| <b>Figura 97</b>  | Redução do consumo de energia X quantidade de matéria prima                                                        | 139 |
| <b>Figura 98</b>  | Consumo de energia X produção de metal líquido (com sucata e com briquetes e gusa)                                 | 140 |
| <b>Figura 99</b>  | Custos Logísticos                                                                                                  | 141 |
| <b>Figura 100</b> | Etapas para confecção do produto (aglomerado a frio tipo briquete)                                                 | 144 |

|                   |                                                                                                             |     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 101</b> | Misturador de bancada                                                                                       | 147 |
| <b>Figura 102</b> | Desenho do molde de briquetagem                                                                             | 148 |
| <b>Figura 103</b> | Molde de briquetagem                                                                                        | 148 |
| <b>Figura 104</b> | Sistema de briquetagem (prensa + molde)                                                                     | 149 |
| <b>Figura 105</b> | Briquetes produzidos nesta dissertação (o produto)                                                          | 149 |
| <b>Figura 106</b> | Resultado dos testes de compressão simples nas matérias primas e nos briquetes                              | 151 |
| <b>Figura 107</b> | Fotomicrografias das fraturas dos briquetes produzidos nesta pesquisa (após ensaio de compressão diametral) | 153 |
| <b>Figura 108</b> | Fotomicrografias dos briquetes aglomerados com escória de aciaria (produto objetivo desta pesquisa)         | 154 |
| <b>Figura 109</b> | Fotomicrografia de MEV das fraturas dos briquetes, aumento de 100x                                          | 156 |
| <b>Figura 110</b> | Micrografia do briquete com calcário + dolomita + cal                                                       | 157 |
| <b>Figura 111</b> | Fotomicrografia de MEV do briquete aglomerado com escoria de aciaria elétrica                               | 157 |
| <b>Figura 112</b> | Micrografias do aspecto da fratura do briquete aglomerado com bentonita                                     | 158 |
| <b>Figura 113</b> | Fotomicrografia de MEV do briquete multiconstituído desenvolvido nesta dissertação                          | 159 |

## LISTA de TABELAS

|                                                                                                                                            | Pág.: |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tabela 1</b> Classificação do Tamanho das partículas dispersas                                                                          | 32    |
| <b>Tabela 2</b> Comparação dos processos de compactação em diferentes campos                                                               | 42    |
| <b>Tabela 3</b> Processos de aglomeração<br>(Tecnologias consolidadas de reciclagem de resíduos)                                           | 43    |
| <b>Tabela 4</b> Evolução do uso de ligantes e aditivos na aglomeração a frio                                                               | 46    |
| <b>Tabela 5</b> - Matérias primas utilizadas em aglomeração a frio                                                                         | 47    |
| <b>Tabela 6</b> Composição química típica das escórias de alto-forno, aciaria e do cimento                                                 | 52    |
| <b>Tabela 7</b> Comparação das características do clínquer Portland a do Cimento Portland em relação à escória de alto-forno e de aciaria. | 52    |
| <b>Tabela 8</b> Exigência química para classificar um material como pozolânico, de acordo com a norma ABNT 12653                           | 56    |
| <b>Tabela 9</b> Mostra a aplicação do índice de Vicat.                                                                                     | 60    |
| <b>Tabela 10</b> Comparação entre alto-forno a carvão e a coque                                                                            | 67    |
| <b>Tabela 11</b> Características do coque e carvão vegetal para fornos de redução                                                          | 67    |
| <b>Tabela 12</b> Valores de Resistência em MPa das Matérias Primas Extraídos da Literatura                                                 | 69    |
| <b>Tabela 13</b> Requisitos de qualidade da carga metálica nas diversas regiões do alto-forno                                              | 72    |
| <b>Tabela 14</b> Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete.                    | 73    |
| <b>Tabela 15</b> Principais insumos e produtos energéticos e materiais na produção de aço                                                  | 74    |

|                  |                                                                                                                                                   |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 16</b> | Materiais carregados nas corridas com briquetes                                                                                                   | 97  |
| <b>Tabela 17</b> | Balanço de enxofre típico para um alto-forno                                                                                                      | 102 |
| <b>Tabela 18</b> | Valores típicos de custo de insumos                                                                                                               | 104 |
| <b>Tabela 19</b> | Insumos em Altos-Fornos                                                                                                                           | 105 |
| <b>Tabela 20</b> | Carga metálica usada em altos-fornos no Brasil e em alguns países                                                                                 | 105 |
| <b>Tabela 21</b> | Composição química do ferro gusa produzido através dos diferentes processos alternativos                                                          | 109 |
| <b>Tabela 22</b> | Benefícios ao meio ambiente gerados pela utilização de materiais reciclados em comparação aos recursos virgens                                    | 116 |
| <b>Tabela 23</b> | Consumo de carbono e emissão de CO <sub>2</sub> na produção de ferro primário líquido em altos-fornos e no processo emergente/alternativo Oxycup. | 119 |
| <b>Tabela 24</b> | Valor de equilíbrio em relação a matéria-prima substituída com o uso de briquetes                                                                 | 127 |
| <b>Tabela 25</b> | Valores típicos de insumos de aciaria a oxigênio por tonelada de aço líquido                                                                      | 131 |
| <b>Tabela 26</b> | Carga Metálica do Forno elétrico a arco (aciaria elétrica) (Kg/t de aço líquido)                                                                  | 131 |
| <b>Tabela 27</b> | Custos percentuais de um FEA de 100 t de alta performance                                                                                         | 133 |
| <b>Tabela 28</b> | Energia requerida para extração de alguns metais a partir de seu minério mais característico                                                      | 138 |
| <b>Tabela 29</b> | Energia específica requerida para a extração do metal em comparação com a sua recuperação por processamento de recicláveis (aglomerados)          | 138 |

|                  |                                                                                                                                                                                                 |     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 30</b> | Redução do consumo de energia obtida em função do uso de recicláveis sólidos na carga de fornos de produção de ferro primário (alto-forno e outros fornos), para um rendimento metálico de 90%. | 139 |
| <b>Tabela 31</b> | Custo de operação com o uso de briquetes                                                                                                                                                        | 140 |
| <b>Tabela 32</b> | Composição de Matéria prima dos Briquetes                                                                                                                                                       | 144 |
| <b>Tabela 33</b> | Composição da escória MRPL                                                                                                                                                                      | 145 |
| <b>Tabela 34</b> | Composição de Escória de Aciaria Elétrica                                                                                                                                                       | 145 |
| <b>Tabela 35</b> | Composição da carga de carbono                                                                                                                                                                  | 145 |
| <b>Tabela 36</b> | Composição química e perda por calcinação (PPC) das amostras de minério de ferro.                                                                                                               | 146 |
| <b>Tabela 37</b> | Composição química da bentonita                                                                                                                                                                 | 146 |
| <b>Tabela 38</b> | Composição em peso das misturas briquetadas                                                                                                                                                     | 147 |
| <b>Tabela 39</b> | Valores do ensaio de resistência à compressão diametral                                                                                                                                         | 152 |
| <b>Tabela 40</b> | Média dos valores da compressão diametral                                                                                                                                                       | 152 |

## LISTA de EQUAÇÕES

Pág.:

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Equação (1)</b> Regra das Misturas - Correlação da resistência do briquete composto com a resistência e fração volumétrica dos materiais que é formado | 41 |
| <b>Equação (2)</b> Calculo da Variação do limite de resistência mecânica ( $S_u$ ) de um briquete composto                                                | 41 |
| <b>Equação (3)</b> Avaliação das tensões da matriz e da fase dispersa formadoras do briquete composto                                                     | 41 |
| <b>Equação (4)</b> Avaliação das deformações reinantes na matriz e na fase dispersa formadoras do briquete composto                                       | 41 |
| <b>Equação (5)</b> Correlação da Atividade Química com a Basicidade Binária de uma Escória                                                                | 53 |
| <b>Equação (6)</b> Correlação da Atividade Química com a Basicidade Terciária de uma Escória                                                              | 53 |
| <b>Equação (7)</b> Correlação da Atividade Química com a Basicidade Quaternária de uma Escória                                                            | 54 |
| <b>Equação (8)</b> Determinação do Índice de Pega Hidráulica Através da Norma UNE 83480EX, modo 1                                                         | 54 |
| <b>Equação (9)</b> Determinação do Índice de Pega Hidráulica Através da Norma UNE 83480EX, modo 2                                                         | 54 |
| <b>Equação (10)</b> Determinação do Índice de Pega Hidráulica Através da Norma UNE 83480EX, modo 3                                                        | 54 |
| <b>Equação (11)</b> Correlação da Basicidade com a Hidraulicidade de uma Escória                                                                          | 54 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Equação (12)</b> Correlação da Reatividade da Escória com a sua Composição Química conforme a Norma Alemã DIN 1164 | 55 |
| <b>Equação (13)</b> Correlação da Reatividade da Escória com a sua Composição Química Aplicando a metodologia de Dron | 55 |
| <b>Equação (14)</b> Determinação do Módulo de Saturação de Cal da Escória (LSF)                                       | 55 |
| <b>Equação (15)</b> Determinação do Módulo de Sílica da Escória (SR)                                                  | 55 |
| <b>Equação (16)</b> Determinação do Módulo de Alumina ou Alumino-Férrico da Escória (AR)                              | 55 |
| <b>Equação (17)</b> Determinação do Fator de Saturação de Cal de uma Escória (FSC)                                    | 55 |
| <b>Equação (18)</b> Cálculo do Índice de Hidraulicidade da Escória, modo 1                                            | 58 |
| <b>Equação (19)</b> Cálculo do Índice de Hidraulicidade da Escória, modo 2                                            | 58 |
| <b>Equação (20)</b> Cálculo do Índice de Hidraulicidade da Escória, modo 3                                            | 59 |
| <b>Equação (21)</b> Determinação do Índice de Cheron e Lardinois                                                      | 59 |
| <b>Equação (22)</b> Determinação do Índice de Langavant                                                               | 59 |
| <b>Equação (23)</b> Determinação do Índice Blondiau, modo 1                                                           | 59 |
| <b>Equação (24)</b> Determinação do Índice Blondiau, modo 2                                                           | 59 |
| <b>Equação (25)</b> Determinação do Módulo Hidráulico de uma Escória (MH)                                             | 59 |
| <b>Equação (26)</b> Determinação do índice de Vicat de uma Escória (IH)                                               | 60 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Equação (27)</b> Calculo do Custo Total Anual de Armazenagem    | 141 |
| <b>Equação (28)</b> Calculo do Custo de Armazenagem por Lote Anual | 142 |
| <b>Equação (29)</b> Calculo do Custo de Armazenagem Geral          | 142 |
| <b>Equação (30)</b> Calculo do Custo de Transporte                 | 143 |

## **LISTA de SIGLAS**

FEA – Forno Elétrico a Arco

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MRPL - Metal Refining Process by Lance (Refino de Metal por Lança)

ASTM -

PRC – Particulate Reinforced Composite (Compósitos reforçados com partículas)

GCFS - Ground-Cooled Ferrous Slag (Escórias ferrosas resfriadas no solo (ao ar))

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

P. A. F. – Poder de Aglomeração Frio

LD - Linz e Donawitz (Processo de produção de aço, em vaso de conversão, por injeção de oxigênio no metal líquido via lança)

BOF - Basic Oxygen Furnace (Outra denominação do LD)

BOS - Basic Oxygen Steelmaking (Outra denominação do LD)

CQ - Compactação a quente em alta pressão

CF - compactação fria a baixa pressão

LSF - Módulo de saturação de cal

SR - Módulo de saturação de sílica

AR - Módulo de saturação de alumina ou alumino-férrico

FSC - Fator de saturação de cal

DRI - Direct Reduced Iron

HBI - Hot Briquetted Iron

CMC – Carboximetilcelulose

PAM – Poliacrilamida

HEC - Hidroxietilcelulose)

**BAPTÍSTA, A. L. B. - DESENVOLVIMENTO DE UM BRIQUETE AUTO-FUNDENTE, MULTICONSTITUÍDO DE REJEITOS, RESÍDUOS E DESCARTES RECICLÁVEIS GERADOS NA PLANTA INTEGRADA DE PRODUÇÃO DE AÇO, APLICADO COMO COMPONENTE DA CARGA DE FORNOS DE REDUÇÃO DE FERRO.** 2016. 195f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha – Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

## **RESUMO**

O presente trabalho consiste no estudo da obtenção de aglomerados, auto-fundentes na forma de briquetes consolidados a frio, utilizando para tal um mix de finos de minérios de ferro e manganês, cal, calcário, dolomita, carvão e coque, aglomerados com escória de processo de refino do aço tipo MRPL (Refino de Metal por Lança) como matérias-primas.

Esta pesquisa é inovadora por ter como premissa a utilização das características cimentícias da escória, promovendo a auto-aglomeração, conferindo resistência a verde e a seco do material; a conversão de um sub-produto em co-produto e a plena utilização de todos os finos gerados na cadeia integrada de fabricação de produtos siderúrgicos.

A obtenção de briquetes dá-se através de três etapas: condicionamento da mistura, briquetagem a frio e cura ao ar (natural). Os finos são misturados e homogeneizados. A mistura, então, passa por processo de compactação, que promove o aumento de contato entre as partículas para obter a forma de um corpo sólido e coeso de geometria cilíndrica num auto-aglomerado.

Os resultados obtidos indicam que é possível produzir um aglomerado com todos os resíduos gerados na siderurgia integrada, apenas prensado e curado a frio e a seco; a escória pode ser utilizada como aglomerante levando o briquete a apresentar uma resistência à compressão acima de 160 MPa, de acordo com o método ASTM C496 e ABNT 7222, corrigido por outros autores, próximo do valor máximo do coque e mínimo da pelota queimada, podendo o mesmo ser carregado em um alto-forno de grande porte e de outros equipamentos similares, concluindo que o processo de briquetagem somado a propriedade aglomerante da escória de aciaria, permite moldar uma mistura de muitos finos.

**Palavras-chaves:** briquetagem, briquete, auto-redutor. resíduos, reciclagem

**BAPTÍSTA, A. L. B. - DEVELOPMENT OF A SELF-FUNDING, MULTICONSTITUTED BRICKETS OF REJECTS, RECYCLABLE RESIDUES AND DISCHARGES GENERATED IN THE INTEGRATED STEEL PRODUCTION PLANT, APPLIED AS A COMPONENT OF THE LOAD OF IRON REDUCTION.**  
2016. 195f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha – Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

### **ABSTRACT**

The present work is the study of the obtention of self-melting pellets in the form of cold-consolidated briquettes, using for such a fine mix of iron ore and manganese, lime, limestone, dolomite, coal and coke, agglomerated with process slag from steel refining of MRPL (Metal Refining Process by Lance) type as raw materials. This research is groundbreaking because it has the premise of using the cementitious characteristics of slag, promoting self-agglomeration, conferring resistance to green and dry material; the conversion of a sub-product and co-product and the full use of all fines generated in the integrated chain of manufacturing steel products. The briquette obtention takes place through three steps: conditioning of the mixture, briquetting and cold air-curing (natural). The fines are mixed and homogenized. The mixture then goes through the compression process, promoting increased contact between particles to obtain a solid and cohesive body of cylindrical geometry in a self-agglomerate. The results indicate that it is possible to produce a cluster with all the waste generated in the integrated steelworks, only pressed and cold and dried cured; slag can be used as a binder taking the briquette to present a compression resistance above 160 MPa according to ASTM C496 and ABNT 7222 methods, corrected by other authors, near the maximum value of the coke and minimum of the burning pellet value, may the same being loaded into a large blast furnace and other similar equipment.

**Keywords:** briquetting, briquette, self-agglomerate.

## 1 – INTRODUÇÃO

O ferro é uma das matérias primas básicas que sustentam o progresso tecnológico da humanidade, componente fundamental no processo de industrialização de qualquer país. Por ser a matéria básica na composição do aço, está presente na fabricação de máquinas e equipamentos, na construção civil e na indústria de bens de consumo. Trata-se de um dos recursos minerais mais baratos e com amplo espectro de aplicação em praticamente todas as áreas da indústria.(Baptista,2016)

Os rejeitos são consequência inevitável dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios paralelamente, ao produto de interesse, até a sua transformação final em ferro e aço, sendo gerados,. Esses rejeitos, que são produzidos em grande quantidade, afetam de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente. A grande produção de rejeito tem gerado uma preocupação cada vez maior nas empresas que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de disposição e contenção desse material. (Espósito,2005)

Para a sobrevivência das futuras gerações a reciclagem de materiais é essencial para a sustentabilidade do planeta, reduzindo significativamente os impactos ambientais das atividades antrópicas e diminuindo a demanda por recursos naturais. Com o crescimento da atividade reciclagem abriu-se novas oportunidades no mercado, com reflexos não só econômicos-financeiros bastantes positivos, como também ambientais e sociais. (Vieira, 2007)

O aumento da população mundial e a alta demanda de mercadorias principalmente nos países industrializados, e em desenvolvimento, tem provocado um substancial aumento no fluxo de resíduos. (Baptista, 2013)

A expressão resíduo engloba refugo, descarte, aparas, perdas, sucata, inutilizados, rejeitos e outros. Com o aumento do volume destes, começaram a surgir problemas de naturezas variadas: dependendo do resíduo, seu transporte e acondicionamento era muito custoso; em outro existia risco de contaminação para

quem o manipulava; outro continha elementos de valor econômico atraentes; contudo, sua extração era prejudicial ao meio ambiente. (Endemann, 2015)

Toda atividade industrial provoca impacto ambiental. A geração de resíduos, como subprodutos, não importa de que material seja feito, provoca um impacto ambiental, seja em função do processo produtivo, da matéria-prima utilizada, ou da disposição final do produto. (Araujo, 2013)

Dentro de uma visão absolutamente geral, pode-se dizer que, em qualquer atividade industrial, são empregados, insumos, principais e secundários e são gerados produtos, subprodutos e resíduos. Tanto ao primeiro, quanto ao segundo grupo, correspondem materiais sólidos, líquidos, gasosos e energia. (Baptista, 2011)

Dentre as preocupações advindas da geração de resíduos industriais, duas são as principais que motivam a busca de soluções para este problema. Uma delas é referente à destinação a ser dada aos resíduos dos processos siderúrgicos, devido ao dano que estes podem causar ao meio ambiente, aliado à própria dificuldade de reutilização, sem novo processamento, de tais resíduos na indústria siderúrgica. Outra preocupação significativa, de caráter econômico, é a minimização de custos e a otimização de resultados. (Cassola, 1999)

Especificamente, dentro de uma ótica de reciclagem, um resíduo deixa de sê-lo, na medida em que são desenvolvidas aplicações quer no âmbito interno, quanto externo à planta. Neste caso, ele passa a ser, respectivamente, um insumo ou um subproduto. (Moraes, 2013)

Do ponto de vista ambiental, qualquer resíduo é, em maior ou menor extensão, um agressor no meio ambiente. Assim, as alternativas perseguidas para solução do problema são, em ordem de preferência: não geração, reciclagem e disposição final. (Baptista, 2013)

Sendo a não geração, em termos absolutos, uma impossibilidade teórica, sempre haverá, por maior que seja a eficiência do processo, resíduos disponíveis. Isto torna a reciclagem a opção a ser considerada, prioritariamente. (Endemann, 2015)

Segundo esta filosofia, a reciclagem resulta em receita, enquanto a disposição se constitui em ônus. Resulta daí que uma alternativa de reciclagem só tem caráter duradouro se for economicamente atrativa. (Pereira, 1994)

Cumprir lembrar que o uso de resíduos só é considerado como reciclagem quando o balanço custo-benefício é positivo. Evidentemente esta avaliação é feita dentro de um contexto global. (Cassola, 1999)

A metalurgia é, entre outros objetivos, a ciência da extração dos metais dos seus minérios, preparando-os para os diversos usos para os quais eles são necessários. Dentro da metalurgia temos a siderurgia, a qual estuda as técnicas de elaboração dos produtos ferrosos: gusa (liga de ferro e carbono e outros elementos incorporados direta ou indiretamente), aço e ferros fundidos. (Baptista, 1999)

Embora haja uma preocupação crescente com os impactos das atividades industriais no meio ambiente, o aumento da produção das siderúrgicas em todo o mundo esperado para os próximos anos, inevitavelmente, virá acompanhado de uma maior quantidade de resíduos gerados. (Pereira, 1994)

Pressionadas por entidades ambientais, a legislação brasileira está cada vez mais rigorosa no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Esses fatores influenciam as indústrias a procurarem processos de fabricação alternativos, com a criação de tecnologias que minimizem ou evitem a geração de resíduos que agridem o meio ambiente. (Baptista, 2013)

A produção de aço em uma usina integrada, onde existe a preparação da matéria prima (calcinação, coqueria, sinterização), redução do minério em alto-forno, refino em conversor, lingotamento e conformação em produto acabado gera grandes quantidades de finos, que dificultam de diversas formas a utilidade imediata destes, fundamentalmente por fatores econômicos. A presença de finos, além de onerar o processo de seu beneficiamento, cria problemas relacionados com a poluição ambiental, o manuseio, o transporte e a estocagem. Evidentemente, a aglomeração das partículas finas em unidades maiores e mais resistentes ao trabalho mecânico resolveria, em princípio, estes problemas. (Senk, 2005)

A tecnologia também contribui diretamente de forma sustentável ao transformar passivo ambiental em insumo economicamente aproveitável. (Flores, 2014)

Assim existe uma necessidade de resolver o problema de processamento dos finos, para a obtenção de uma matéria-prima com as características desejadas pelo mercado e seus processos tecnológicos relativos a sua utilização. (Junca, 2011)

Uma das possibilidades de obtenção de um produto aproveitável no processos metalúrgicos seria através da aglomeração (a quente ou a frio, a úmido ou a seco, com ou sem ligantes) destas partículas finas em unidades maiores e mais resistentes aos trabalhos mecânicos. (Flores, 2014)

A escolha de um determinado processo será função das características tecnológicas e econômicas, nas quais influem inúmeras variáveis físicas e físico-químicas do produto e sua interação com a água e/ou ligante. (Junca, 2011)

O termo aglomeração é em geral empregado para designar algumas operações aplicadas a materiais de granulometria fina, para transformá-los em corpos maiores, ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, entre si, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho, forma e propriedades particulares adequadas ao uso. (Flores, 2014)

A briquetagem é um dos processos mais antigos de aglomeração e caracteriza-se pela aplicação de pressões externas com conseqüente redução de volume do material fino, obtendo um produto (briquete) com forma, dimensões e características variáveis e totalmente controladas, conforme a sua aplicação. É influenciado por fatores como: granulometria do material, umidade, tipo e quantidade de ligante e variáveis de compactação (esforço, tempo, etc). O produto resultante deste processo é o briquete, que é uma matéria prima sintética, um mineral industrial, um composto (Junca, 2011)

A briquetagem pode facilitar, melhorar e possibilitar melhores alternativas de utilização de finos. (Rezende, 2007)

Durante o processo de briquetagem de partículas, contendo óxidos de ferro, os mecanismos de aglomeração, a força de compactação da mistura a ser briquetada, teor e qualidade dos ligantes, temperatura, umidade, tipo de máquina de briquetagem e tempo de cura são importantes para conceder adequada resistência mecânica aos briquetes, de acordo com diversas finalidades.(Flores, 2014)

As cargas ferríferas convencionais para uso em alto-forno são: sínter, pelota e minério de ferro granulado. E a briquetagem surge como uma alternativa para uso de resíduos siderúrgicos, que contém óxidos de ferro, neste processo de aglomeração, com possíveis utilizações no alto-forno. Esses aglomerados devem possuir resistência mecânica ao manuseio, estocagem e à utilização em determinados reatores metalúrgicos, tais como: fornos elétricos a arco, convertedores LD e altos-fornos. (Junca, 2011)

No presente estudo visa-se desenvolver um briquete cilíndrico, que resista as condições encontradas no interior de um alto-forno de grande porte, multi-constituído de finos de carga metálica (minério de ferro e minério de manganês), de carga redutora (coque e carvão) de carga fundente (calcário e dolomita) empregando como aglomerante escória de processo de conversão de gusa em aço tipo MRPL (Refino de Metal por Lança) onde engloba os processos LD (Linz e Donawitz) ou BOF (Basic Oxygen Furnace) ou BOS (Basic Oxygen Steelmaking) e tendo como aditivo cal hidratada, compactado a frio e curado ao ar, utilizando-se por característica principal de aceitação para o destino proposto, a resistência a compressão diametral.

## **2 - OBJETIVO GERAL :**

O objetivo deste trabalho é verificar se é possível substituir na função de ligante o mineral natural bentonita por escória de conversão e refino de aço a base de oxigênio e aglomerar por briquetagem os diversos descartes finos da siderurgia utilizando a resistência mecânica como parâmetro balizador. Para tanto efetuou-se ensaios de compressão simples nas matérias primas principais utilizadas em alto-forno, como caráter orientativo direto e nas misturas briquetadas.

### **2.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS :**

- 1) Produzir um briquete com finos de minério (carga metálica), fundentes (calcário, cal), coque, carvão vegetal , escória de aciaria
- 2) Alcançar a propriedade mecânica de resistência em torno de 160 Mpa mínimo
- 3) Utilizar como aglomerante escória de aciaria de processo (MRPL) refino de metal por lança
- 4) Alcançar a resistência mecânica requerida por cura natural, sem estufar ou queimar o aglomerado, deste modo sem consumir energia térmica.

## **3 - REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

Neste capítulo serão abordados aspectos pertinentes ao “status quo” dos briquetes, passíveis da utilização na metalurgia de redução.

A área dos materiais é muito abrangente e a sua evolução histórica acompanha a própria evolução da humanidade e do mundo civilizado. É praticamente impossível imaginar uma atividade humana sem a utilização de um material qualquer.(Baptista, 2015)

Embora os materiais estejam disponíveis ao homem há milhares de anos, estes só receberam a atenção e o estudo adequados no momento em que o ser humano foi capaz de fazer uso dos materiais para aproveitamento próprio. (Galvão, 2010)

Se buscarmos as linhas de estrutura do progresso, através da história observamos que, os materiais de fabricação, evoluíram da madeira para a pedra, seguida da argila e depois vieram o cobre e o chumbo, passando para o ferro e mais adiante o aço.(Baptista, 2009)

O conhecimento humano sobre os metais, até a Renascença, reduzia-se a apenas sete deles : ouro, prata, cobre, ferro, mercúrio, estanho e chumbo. Em 1500 e 1700, mais três foram descobertos e durante o século XVIII outros quatorze foram descobertos.(Baptista, 2011)

Desde 1801, outros metais foram isolados e incorporados a tabela periódica dos elementos químicos. Os mais importantes em termos metalúrgicos foram o zinco, níquel, magnésio e alumínio.(Baptista, 2011)

Os metais ocupam uma posição mandatória no desenvolvimento industrial e tecnológico da era moderna, sendo hoje o pilar essencial de importantíssimos segmentos produtivos, tais como as indústrias de veículos, máquinas de bens de capital, indústria naval entre outras.(Baptista,1996)

Motivado pelo constante desenvolvimento tecnológico e pela necessidade de adequar a infra-estrutura à necessidade humana, o desenvolvimento de materiais que atendessem aos mais diversos requisitos – mecânicos, físicos, ambientais e de custos se fez necessário.(Galvão, 2010)

Parafraseando o físico e químico neozelandês Ernest Rutherford, que se tornou conhecido como o pai da física nuclear, “um povo que não desenvolve sua ciência e tecnologia está fadado a transformar-se em mero carregador de lenha e de latas d’água para os povos desenvolvidos”.(Baptista, 2013)

O conceito de “novos materiais” desperta polêmica, porque não acredita em estudos diferentes para novos e velhos materiais, tendo em vista que o instrumental de pesquisa é o mesmo e as formas de estudo também. A discussão em torno do novo é ruim porque acaba privilegiando as grandes novidades, as quais nem sempre tem aplicabilidade imediata. É melhor investir nos pequenos desenvolvimentos, dentro da classe de materiais já existentes, que podem ser trabalhados para novas

aplicações. As políticas de desenvolvimento científico e tecnológico priorizem os materiais já existentes, em que as possibilidades de impacto econômico e social são maiores. Novos conceitos são adaptações de velhas idéias que estavam esquecidas.(Padilha, 1989)

Apesar dos significativos desenvolvimentos nos campos dos polímeros e cerâmicos, os metais e suas ligas continuam sendo insubstituíveis numa ampla gama de aplicações, particularmente como materiais de construção mecânica e estrutural, devido a sua excelente combinação de propriedades de resiliência, condutibilidade elétrica e térmica, ferro-magnetismo, elasticidade e principalmente, de plasticidade. (Baptista, 2010)

Os aços constituem-se numa importante classe de materiais metálicos usados em engenharia, oferecendo uma combinação altamente atraente de características de fabricabilidade como bom comportamento no corte, boa conformação, soldabilidade, usinabilidade e pintabilidade, total aceitação de revestimentos, larga faixa de resistência mecânica e alguma resistência a corrosão e degradação com uma relação custo/benefício inatingível pela maioria das demais ligas existentes.(Assunção, 2010)

Assim como nos primórdios da humanidade, as emoções e reações do “*Homo Sapiens*” aceleram o processo de evolução no planeta, os atuais protagonistas da sociedade do conhecimento são cada vez mais desafiados a superar a escassez de recursos naturais, para garantir o desenvolvimento. É bem provável que os sinais de incerteza neste sentido estejam embutidos no conceito de sustentabilidade, como alerta à industrialização a qualquer preço.(Baptista, 2013)

Materiais desenvolvidos com foco apenas nas propriedades necessárias à aplicação do produto final e nos processos produtivos que visam tão somente a obtenção do máximo lucro culminaram em rejeitos de difícil decomposição , alta toxicidade, dentre outras tantas propriedades estranhas à natureza, causando os desdobramentos que se presenciam na atualidade,; alterações climáticas , desertos que não param de crescer, desequilíbrios nos ecossistemas.(Melo, 2009)

Desenvolver a preservação é preservar o desenvolvimento, transformando a siderurgia em uma atividade ambientalmente sustentável, provando que é possível desenvolver e preservar ao mesmo tempo. Com soluções criativas e inteligentes, a gente desenvolve e preserva. O melhor aproveitamento das matérias-primas e a busca de tecnologias que permitem o uso de resíduos vêm ganhando espaço na siderurgia e na mineração, visando otimizar as cadeias produtivas. (Assunção, 2010)

Mais do que aço, a siderurgia produz e vende soluções para uma vida melhor, pois tudo que tem forma, tem aço. Seja na sua composição ou na sua fabricação. É a tecnologia que você não vê, presente em tudo que você toca. Todo componente de aço está destinado a melhorar nossa qualidade de vida e o meio ambiente, de maneira sustentável, desde a matéria prima empregada, composta de material integralmente reciclável, até o reaproveitamento da água utilizada no processo. (Assunção, 2010)

A idéia de se juntar num mesmo conjunto substâncias que em determinadas circunstâncias reajam entre si não é nova. O fogo grego, utilizado pelos Bizantinos, os grãos de pólvora negra, os conjuntos de carga de foguetes a combustível sólido e as cabeças dos palitos de fósforo são exemplos de aglomerados autorreagentes. (Benique, 2007)

Conforme citação de Buzin (2009), esta técnica permite o aproveitamento de resíduos metalúrgicos, que em geral encontram-se em baixa granulometria, além de flexibilizar a produção de ferro e aço a partir de matérias-primas não convencionais.

### **3.1 - AGLOMERAÇÃO DE MATÉRIAS PRIMAS : BRIQUETAGEM**

#### **3.1.1 – Briquete: Um material compósito**

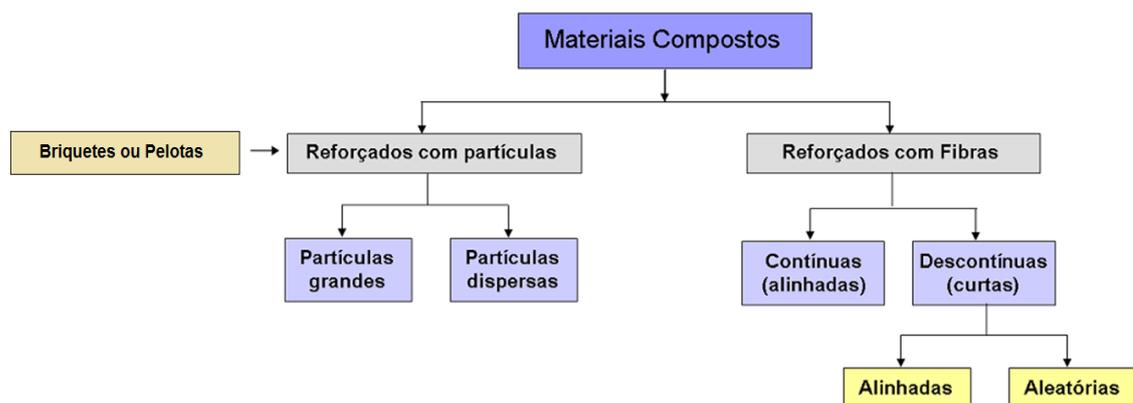
São normalmente bi-compostos ou compósitos (mistura de duas matérias primas para aglomerar – minério + carvão). Podem ser auto-redutores (minério + carvão/coque ou biomassa) ou auto-fundentes (carga metálica + redutores + fundentes), ou metalizados (cura quente), estufados ou queimados e de cura a frio. De acordo com a aplicação metalúrgica se divide em: para sistemas de alta pressão (alto-fornos), média pressão (cubilot) e baixa pressão conversores, painéis, carros-torpedo, fornos elétricos. (Lemos, 2015).

Os materiais compósitos não têm uma definição universalmente aceita. De um modo geral, um material diz-se compósito quando é constituído por dois ou mais constituintes (fases) diferentes. (Rossignolo, 2012)

Com o avanço tecnológico os requisitos exigidos aos materiais comuns mudaram, o que levou ao aparecimento de compósitos capazes de corresponder às novas necessidades. O sucesso de compósitos nas diversas aplicações depende da facilidade de acesso e aplicação das técnicas de fabrico exigidas por cada setor industrial. Cada vez mais, o fabrico de compósitos (de qualquer tipo) constitui um procedimento que pretende atingir valores ótimos de parâmetros como a forma, massa, força, durabilidade, rigidez, custos, etc. Assim, o crescente desenvolvimento de novas tecnologias de produção de compósitos é acompanhado pela alteração e melhoramento destes mesmos parâmetros. A sua fabricação implica a combinação das duas fases (matriz e reforço) para formar um material que de certa forma tem um melhor desempenho que os seus constituintes numa situação particular, dando origem a uma nova geração de materiais com melhores propriedades mecânicas. (Silva, 2004)

A Figura 1 apresenta uma classificação simples dos principais tipos de materiais compostos: (Ahmed, 2014)

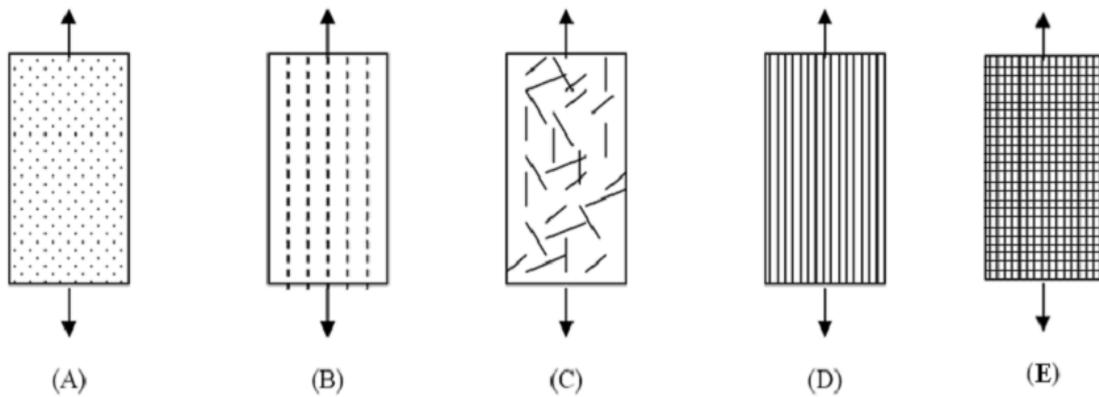
Figura 1 – Classificação dos tipos de compósitos



Fonte: Ahmed (2014)

A Figura 2 representa esquematicamente os tipos padrões de fases dispersas encontrados em compósitos de qualquer tipo de material.

Figura 2 – Exemplos de compostos reforçados



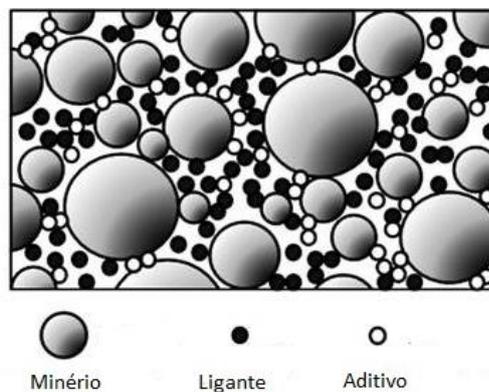
(A) por partículas aleatórias; (B) por fibras descontínuas unidirecionais; (C) por fibras descontínuas aleatórias; (D) por fibras contínuas unidirecionais; (E) por fibras contínuas perpendiculares.

Fonte: Costa, 2010

Um compósito mineral, como o briquete, corresponde ao item (a) da Figura 2.

A figura 3 mostra o esquema de um compósito mineral.

**Figura 3** - Esquemática da composição de um aglomerado



Fonte: Costa, 2010

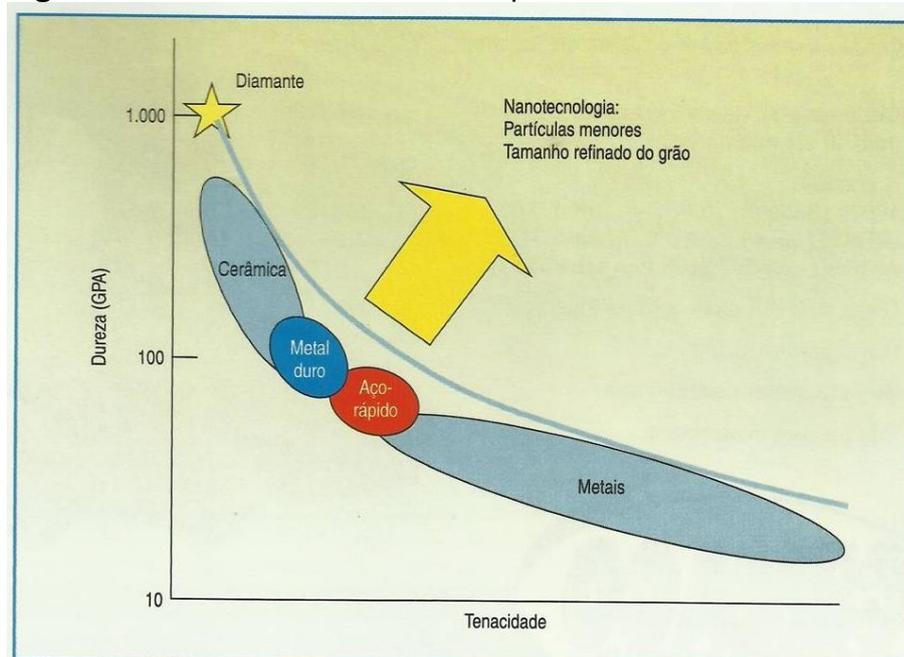
As partículas, quando pequenas podem ser classificadas em: Finos - partículas cujo tamanho médio está compreendido entre  $10\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ ; Ultrafinos - partículas cujo tamanho médio está compreendido entre  $1\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$ ; Colóides - partículas cujo tamanho médio é inferior  $1\mu\text{m}$  ou conforme a Tabela 1 (Takashi, 2008)

**Tabela 1** – Classificação do Tamanho das partículas dispersas

| Grain size              | Name         |
|-------------------------|--------------|
| < 0,2 $\mu\text{m}$     | Nano         |
| 0,2 - 0,5 $\mu\text{m}$ | Ultra-fine   |
| 0,5 - 0,8 $\mu\text{m}$ | Sub-micron   |
| 0,8 - 1,3 $\mu\text{m}$ | Fine         |
| 1,3 - 2,5 $\mu\text{m}$ | Medium       |
| 2,5 - 6,0 $\mu\text{m}$ | Coarse       |
| > 6,0 $\mu\text{m}$     | Extra coarse |

Fonte: Takashi, 2008

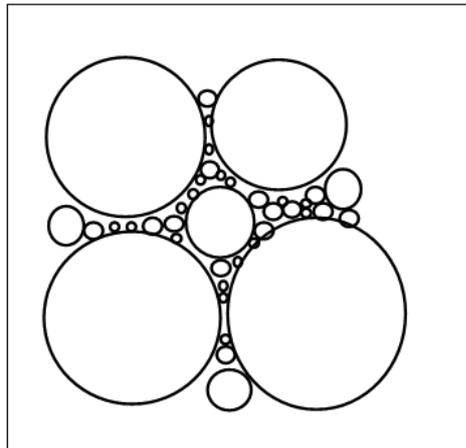
A figura 4 mostra o efeito do refinamento que pequenas partículas distribuídas na matriz tem sobre as propriedades mecânicas.

**Figura 4** – Aumento da resistência pela refinamento da estrutura

Fonte: Baptista, 1996

A figura 5 mostra a melhoria das propriedades pelo efeito de adensamento do material.

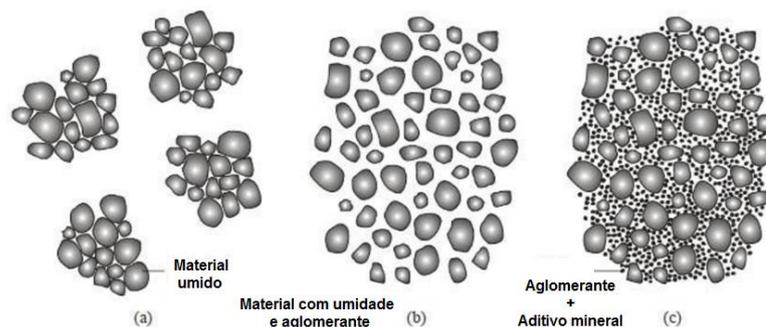
**Figura 5** – Redução da concentração dos poros na massa briquetada devido à variação no tamanho de grãos



Fonte: Pureza, 2004

As partículas dispersas também proporcionam um efeito Filler. O filler é um material extremamente fino sem atividade química que contribui na continuidade granulométrica, onde a ação se traduz em um efeito puramente físico de empacotamento granulométrico e que devido a maior reatividade, advinda da sua superfície específica elevada, acaba por servir como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de materiais cimentícios, ocorre também, um efeito de preenchimento dos poros entre as fases cristalinas do sistema hidratado, devido à granulometria da partícula ser menor que a da mistura, o tendo como consequência maior compacidade e resistência do produto final. O esquema apresentado na Figura 6 possibilita a visualização do efeito filler, através da ação conjunta de um aditivo de elevada finura, um aglomerante e água (Man-Sheng, 2011).

**Figura 6** - Representação esquemática do efeito Filler

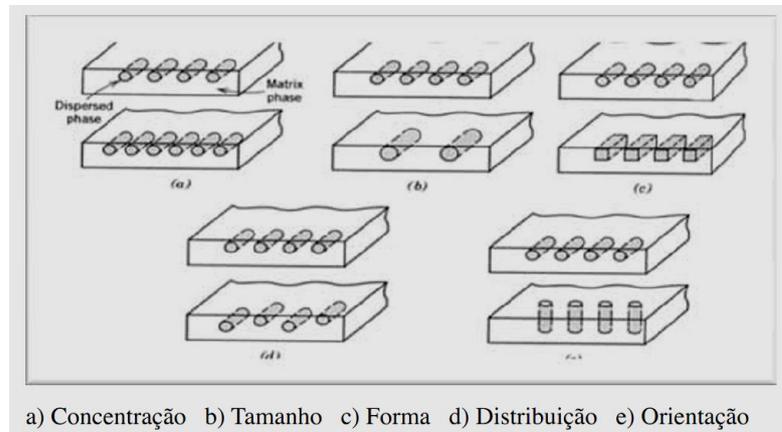


Fonte : Man-Sheng, 2011

Tipicamente, os compósitos são classificados pelo material que forma a matriz que é a fase contínua, que envolve a outra fase, chamada reforço ou fase dispersa. As propriedades dos compósitos dependem de propriedades físicas e de

factores inerentes às fases constituintes, como as suas quantidades relativas e a geometria da fase dispersa (Figura 7). (Ventura, 2009)

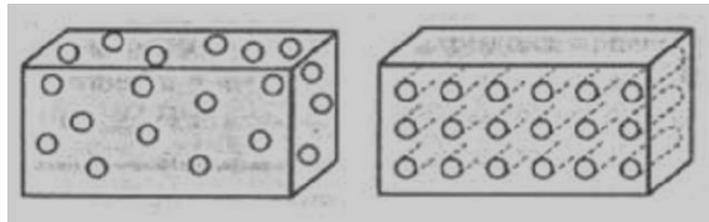
**Figura 7** – Fatores que dependem as propriedades dos compósitos



Fonte: Ventura, 2009

A fase dispersa ou reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em duas categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (whiskers). No geral, os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez (Figura 8) (Ventura, 2009).

**Figura 8** – Classificação segundo sua fase dispersa : particulado ou reforço por fibras



Fonte: Ventura, 2009

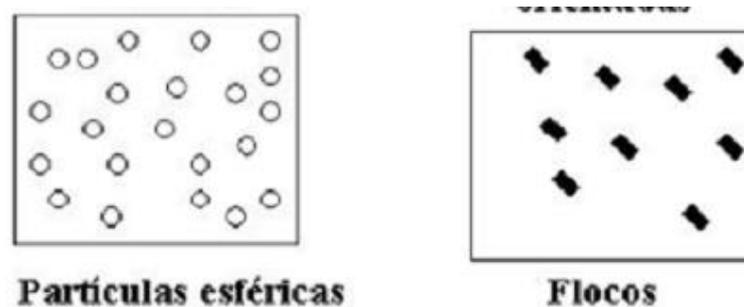
Compósitos reforçados, formados de estrutura base de pós metálicos ou óxidos (ou minério, neste caso pelotas ou briquetes) e cerâmica (ou fases cimentantes) como dispersão, que apresentam partículas de uma fase embutida na outra, são conhecidos como compósitos reforçados com partículas (PRC – Particulate Reinforced Composite) (Ahmed, 2014) ou compósito de carbono e minério na forma de briquetes CCBs (Carbon Composite Iron Ore Briquette) (Kasai, 2001). Este material também é definido como uma matéria prima sintética um mineral industrial, que é produzido empregando fontes recicláveis (Luz, 2008). São conhecidas várias formas de partículas que fazem este reforço, entre elas

quadradas, triangulares e redondas, mas as dimensões observadas de todos os lados são mais ou menos iguais. O tamanho da fase dispersa (partículas) de compósitos pode ser macro, micro ou sub-micro partículas. Normalmente, a força do compósito depende do diâmetro das partículas, do espaço inter-partículas e da fracção de volume do reforço. As propriedades da matriz também influenciam o comportamento do compósito.

A crescente exigência das novas tecnologias em todos os campos fabris, sobretudo no que diz respeito à combinação de propriedades incompatíveis de variados materiais, como a resistência mecânica e tenacidade, levou ao aparecimento de novos materiais. Os compósitos são uma classe destes materiais que possuem diversas aplicações na indústria e são utilizados com o fim de melhorar a produtividade, diminuir os custos e facultar diferentes propriedades aos materiais. Estes materiais (de qualquer natureza) são cada vez mais utilizados como substitutos dos materiais convencionais dado que apresentam vantagens como: elevada rigidez e módulo específico. (Freire, 1994)

Ventura (2009) mostra que em materiais minerais e cerâmicos além dos tipos relatados por Costa (2010) anteriormente soma-se as partículas esféricas e floculares (Figura 9)

**Figura 9** – Disposição dos reforços em materiais minerais ou cerâmicos



Fonte: Ventura, 2009

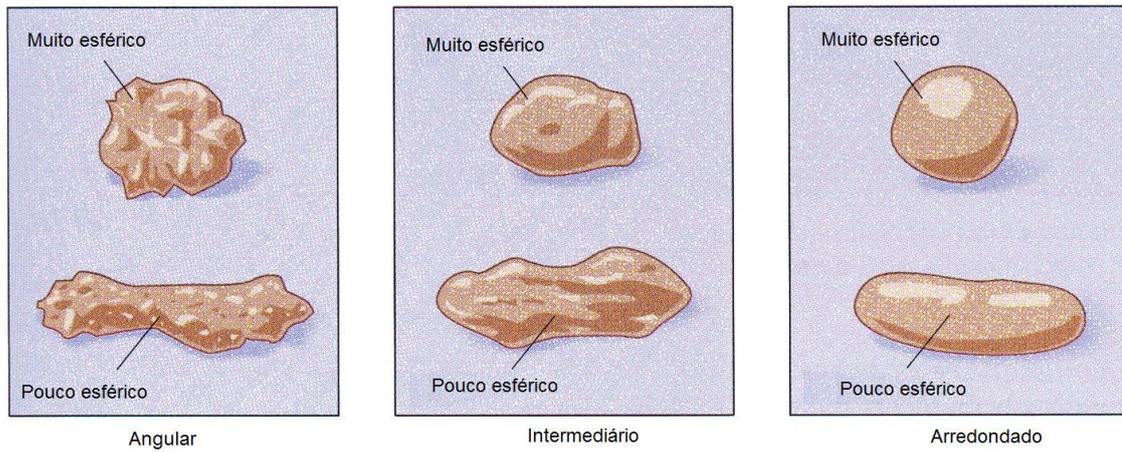
Kasai (2001) e Pietsch (2002) citam que as partículas dispersas em um briquete de matéria-prima são ainda classificadas de acordo com a forma, como mostram as Figuras 10 até 13.

**Figura 10** - Tipos de partículas das partículas esféricas e floculares



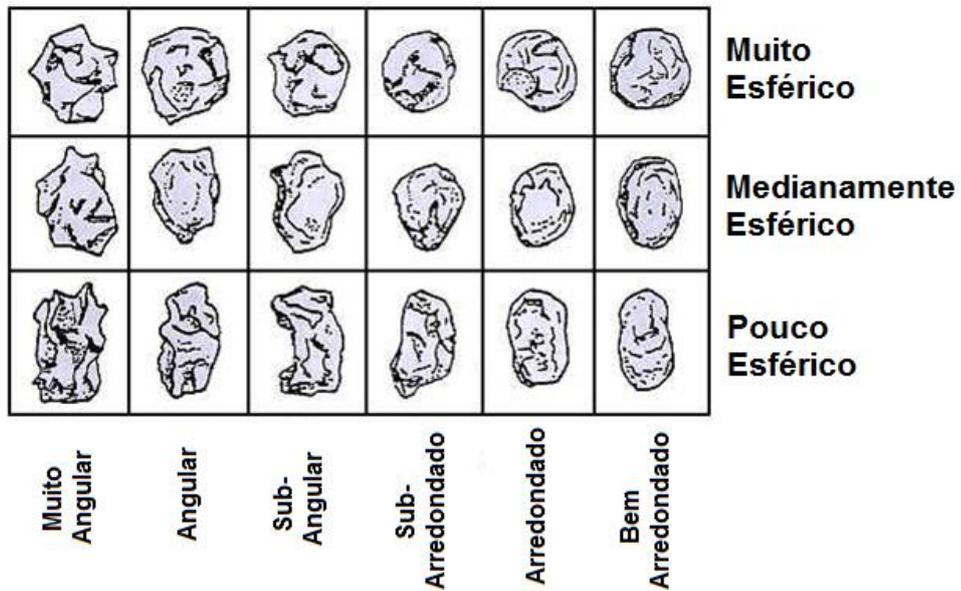
Fonte: Kasai (2001) e Pietsch (2002)

**Figura 11** - Grau de circularidade das partículas esféricas e floculares



Fonte: Kasai (2001) e Pietsch (2002)

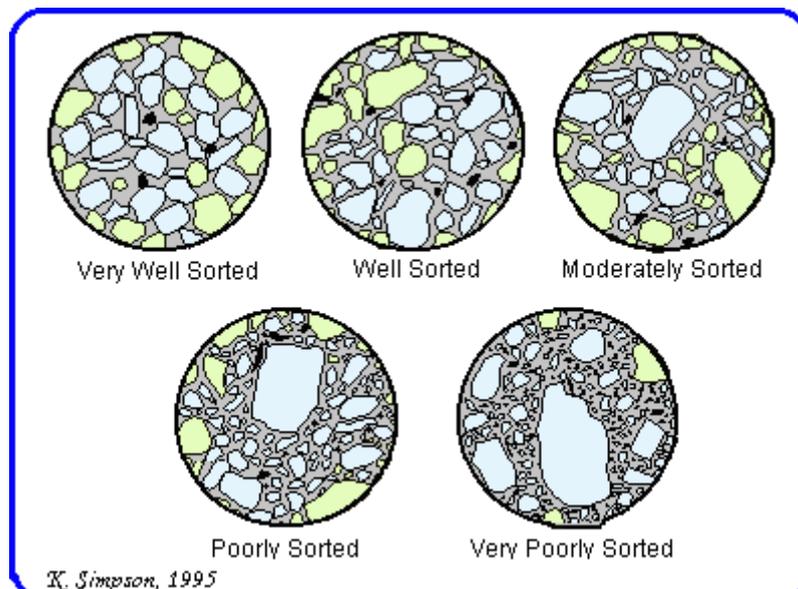
**Figura 12 - Morfologia das partículas esféricas e floculares**



Fonte: Kasai (2001) e Pietsch (2002)

Kasai (2001) e Pietsch (2002) mostram também que a distribuição das partículas em briquetes são classificadas de acordo com o esquema da Figura 13

**Figura 13 – Distribuição de material em um aglomerado**



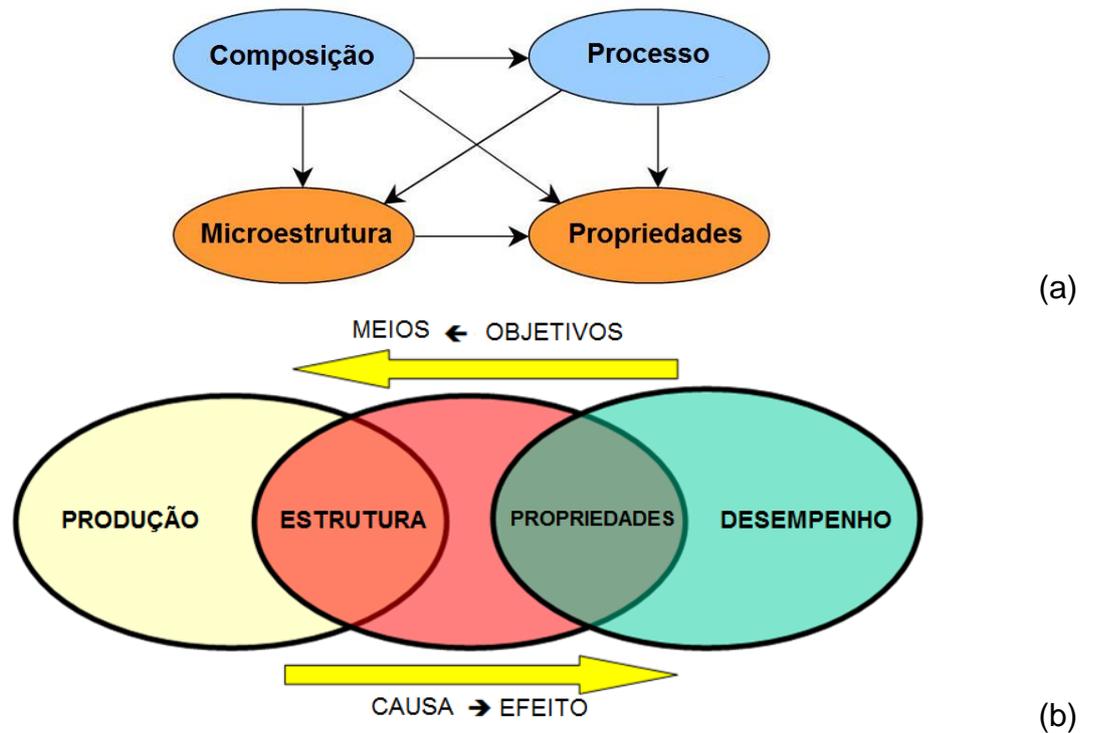
Fonte: Kasai (2001) e Pietsch (2002)

### **3.1.2- Relação entre resistência mecânica dos briquetes e aplicação industrial siderúrgica (Abordagem através dos conceitos de ciências dos materiais)**

Segundo Oliveira (2010), a estrutura é o coração da ciência dos materiais e esta conecta ao processo e com as propriedades diversas. A Figura 14 (a) e (b) ilustra o elo entre processo, propriedades e estrutura. A Figura 15 (a), (b) e (c) ilustra o processo de desenvolvimento de produto na área de matérias-primas. Para alcançar o máximo de desempenho de um produto é necessário compreender as microestruturas e como elas se desenvolvem sob uma combinação de processos. A materiologia é a ciência que estuda as descrições das estruturas e de suas correlações com o processo de fabricação e o comportamento em serviço dos materiais. Essa abordagem, normalmente, tem sido utilizada para relacionar o triângulo (estrutura, processo e propriedades) a produtos manufaturados que já estão prontos para o uso final. O presente trabalho objetiva tratar um produto “intermediário”, ou seja, uma matéria-prima utilizada para a fabricação de ferro gusa, que sob a óptica do processo de alto-forno (consumidor) é um produto “final”, manufaturado a partir dos finos de minério de ferro. Logo, os briquetes de minério de ferro devem atender a uma série de requisitos de qualidade física, química e metalúrgica para atender as necessidades do seu consumidor.

Sob este aspecto, as propriedades requeridas para as matérias primas ferríferas utilizadas no processo de produção de ferro gusa em alto-forno (em destaque a resistência a compressão diametral) relacionam-se intimamente com o processamento a que estes materiais são submetidos, em especial, aos processos de sinterização, pelletização ou briquetagem onde os finos de minério de ferro são unidos em aglomerados que possuem uma série de características químicas e estruturais que afetam o seu comportamento sob redução dentro do reator. (Maximiano, 2011)

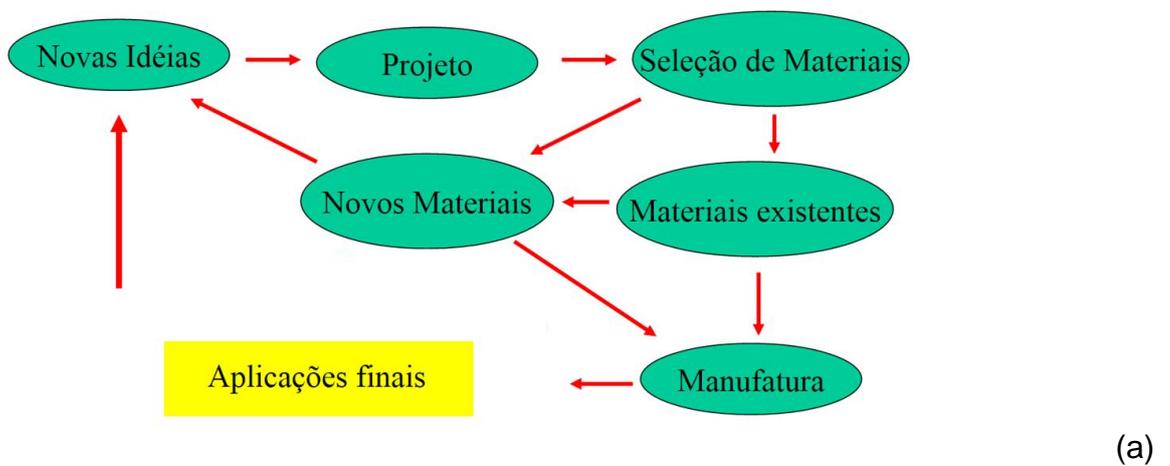
**Figura 14** – Relação de DeHoff entre estrutura, processo e propriedade dos materiais.

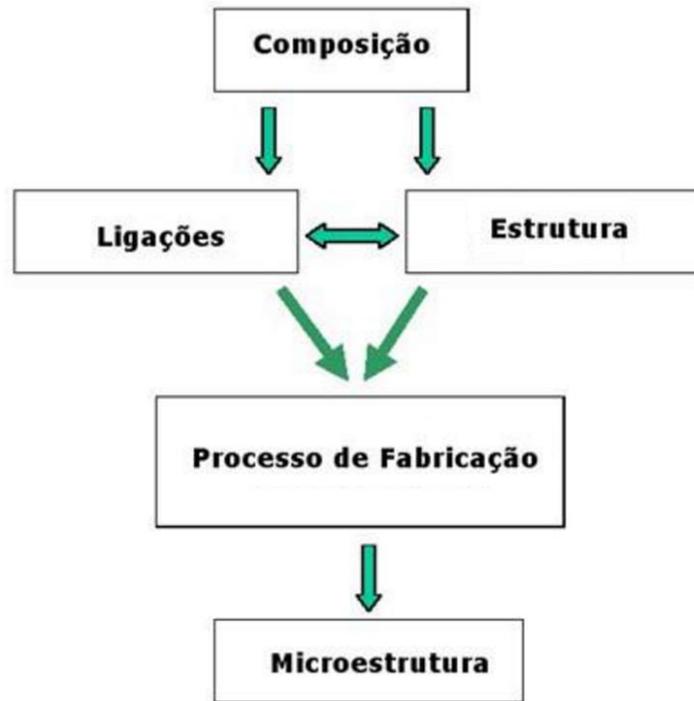


Fonte : Oliveira, 2010

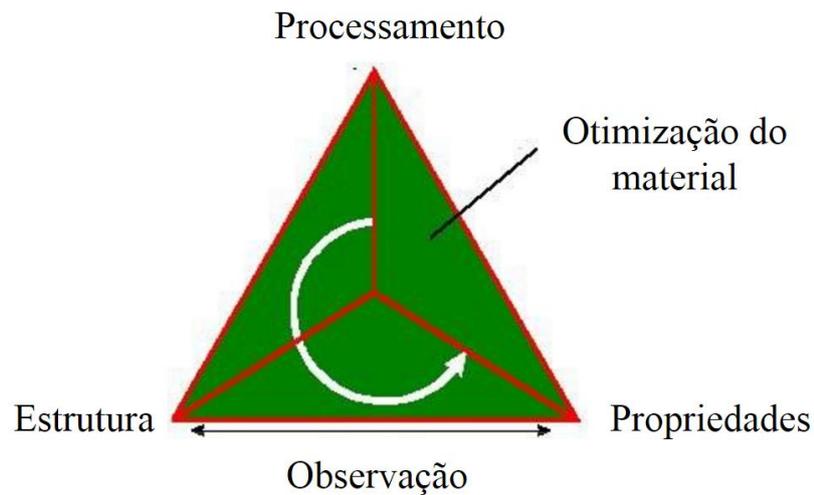
**Figura 15** – Processo de Desenvolvimento de Produto

Engenharia de Materiais e as novas tecnologias





(b)



(c)

Fonte: Baptista, 2011

A maioria dos materiais de interesse tecnológico são constituídos de misturas mais ou menos homogêneas cujo o comportamento em uso (aplicação) depende de vários fatores dos quais o mais importante é a estrutura. (Medeiros, 2014).

As propriedades dos materiais compósitos dependem de um fator primordial chamado de aditividade que esta diretamente ligado a regra das misturas, como visto na equação 1. (Rossignolo, 2012)

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \cdot V_i \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: P é a propriedade do compósito, P<sub>i</sub> a propriedade do componente e V<sub>i</sub> é fração volumétrica do componente.

Deste modo os fatores que influenciam as propriedades finais do material compósito são: propriedades e fração volumétrica dos componentes individuais; distribuição e dispersão da fase dispersa; tamanho, formato e porosidade da carga; interação entre as fases (adesão interfacial). (Rossignolo, 2012)

A fim de melhor apreciar o relacionamento propriedade-estrutura é conveniente considerar a variação do limite de resistência mecânica (S<sub>u</sub>) e de tensão de escoamento (S<sub>e</sub>) das misturas com a fração volumétrica (V<sub>v</sub>) da fase dispersa. (Freire, 1994)

$$S_u = S_{um} \cdot V_v + S_{ud} (1 - V_v) \quad \text{Equação (2)}$$

Um compósito, é uma mistura (um “material conjugado”) cuja resposta em termos de resistência, obedece a regra das misturas clássica ou generalizada, como mostra as equações (Medeiros,2014) :

$$S = S^m \cdot V_v \times (1 - V_v) S^d \quad \text{Equação (3)}$$

$$e = e^m \cdot V_v \times (1 - V_v) e^d \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: S<sup>m</sup> e S<sup>d</sup> são respectivamente, as tensões na matriz (ou base) e na fase dispersa e e<sup>m</sup> e e<sup>d</sup>, são as deformações correspondentes.

### 3.1.3 – Briquetagem

Os processos de aglomeração a frio tendem a se tornar a fonte de matéria prima “natural” mais importante de produção de ferro. Isto se deve a pelo menos quatro razões: o considerável aumento da produção de ferro primário por fontes alternativas ao clássico alto-forno; a maior restrição às siderúrgicas tradicionais devido aos problemas ambientais; aproveitamento de concentrados finos de minério

de ferro por processos de briquetagem e pelletização; a indisponibilidade de matéria prima de alto teor na forma granulada natural. (Martins, 1999)

Os processos industriais já consagrados de obtenção do ferro bruto passaram a exigir uma matéria-prima bastante elaborada, cuja exploração e posterior processamento tem como resultado os seguintes problemas: menor aproveitamento de jazidas(mais descarte e resíduos); problemas ambientais na exploração mineral; problemas ambientais no processamento clássico (sinterização e pelletização); custo energético na elaboração. (Costa, 2008)

Briquetagem é a operação de aglomeração ou adensamento (compactação) de finos a quente ou a frio com uso ou não de pressão mecânica, com a finalidade de produzir uma matéria prima com forma e características definidas de acordo com o uso que será dado a mesma (Carvalho, 2010). As Tabelas 2 e 3 comparam os processos de compactação em vários campos.

**Tabela 2** - Comparação dos processos de compactação em diferentes campos

| <b>Campo</b>                  | <b>Compactabilidade</b> | <b>Limitação</b> | <b>Geometria</b> | <b>Forças</b> |
|-------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|---------------|
| Mecânica do Solo              | Média                   | Alta             | Simples          | Alta          |
| Mecânica do Material a granel | Baixa                   | Alta             | Simples          | Baixa         |
| Metalurgia do pó              | Baixa                   | Média            | Simples          | Alta          |
| Briquetagem                   | Alta                    | Média            | Simples          | Alta          |
| Cerâmica                      | Média                   | Média            | Média            | Média         |
| Fundição                      | Alta                    | Média            | Complicada       | Alta          |

Fonte: Vargas,2007

**Tabela 3 - Processos de aglomeração**  
(Tecnologias consolidadas de reciclagem de resíduos)

| Parâmetros                  | Uso direto na sinterização | Briquetagem            | Moldagem                       | Pelotização                     |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Processo                    | Adição à mistura           | Compressão ou extrusão | Acomodação por vibração e cura | Pelotamento e queima            |
| Controle de operação        | Médio                      | Muito Fácil            | Fácil                          | Relativamente Simples           |
| Ligantes                    | Nenhum                     | Usa                    | Usa                            | Vários tipos                    |
| Distribuição Granulométrica | 0,1 a 5 mm                 | Heterogênea            | Heterogênea                    | Fina (>900cm <sup>2</sup> /g)   |
| Produtividade               | Sem efeito                 | Alta                   | Baixa                          | Média                           |
| Volume de escória           | Médio                      | Baixo                  | Alto                           | Médio                           |
| Contaminantes               | Zn, Álcalis                | Depende do ligante     | Depende do ligante             | Depende do resíduo e do ligante |
| Custos                      | Alto                       | Baixo                  | Médio                          | Alto                            |

Fonte: Vargas,2007

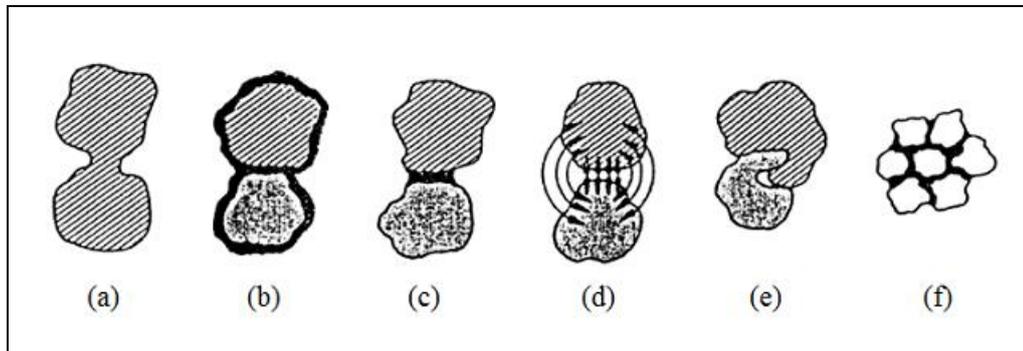
### 3.1.3.1 - Briquetagem com Aglomerantes/Aglutinantes (ou Ligantes)

Aglomerantes / Ligantes (incluindo a água) são elementos que tem a função de unir os grãos das matérias primas por meios físicos e químicos, visando conferir boas propriedades mecânicas, e são usados nos teores de 5 à 12% sobre a carga principal (minério ou carvão/coque) a ser briquetada como visto na Figura 16 (Pietsch, 2002).

### 3.1.3.2 - Consideração sobre a utilização de ligantes

Pelo grande volume normalmente envolvido quando se fala de aglomerantes , para se utilizar um aglomerante comercialmente, devemos levar em conta alguns aspectos quando da utilização do mesmo (Eftting, 2014): Aspecto técnico : as Matérias Primas (MPs) devem ser abundantes na natureza e apresentar certa pureza. Aspecto econômico: apresentar boas condições econômicas no seu aproveitamento. Aspecto ambiental : causar o menor impacto ambiental possível.

**Figura 16** - Mecanismos de ligações na aglomeração. **(a)** fusão parcial das partículas, **(b)** reação química, **(c)** pontes líquidas, **(d)** forças moleculares; **(e)** forças capilares



Fonte: Lemos 2015

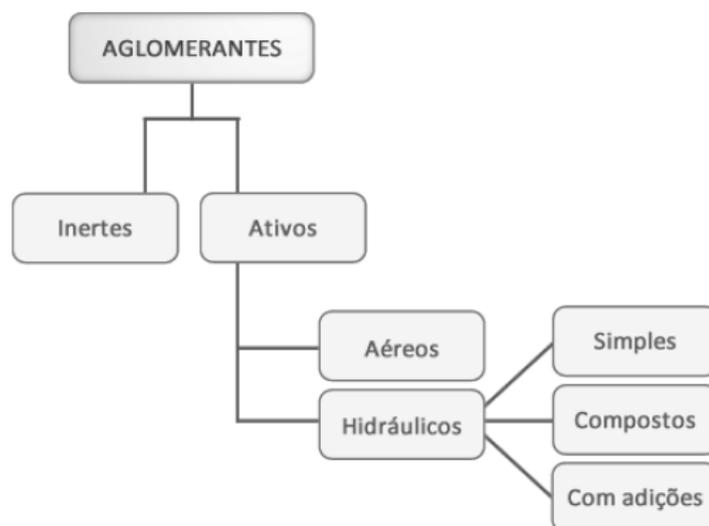
### 3.1.3.3 - Requisitos principais de um aglomerante

Os principais são (Silva, 2013): adesividade; trabalhabilidade; resistência mecânica; durabilidade; economia e viscosidade que permita sua distribuição entre as partículas.

### 3.1.3.4 - Divisão e Classificação de aglomerantes

Os aglomerantes podem ser divididos em diferentes classes de acordo com sua composição e mecanismo de endurecimento (Silva, 2013). O esquema da Figura 17 apresenta de forma resumida a classificação dos aglomerantes de modo geral.

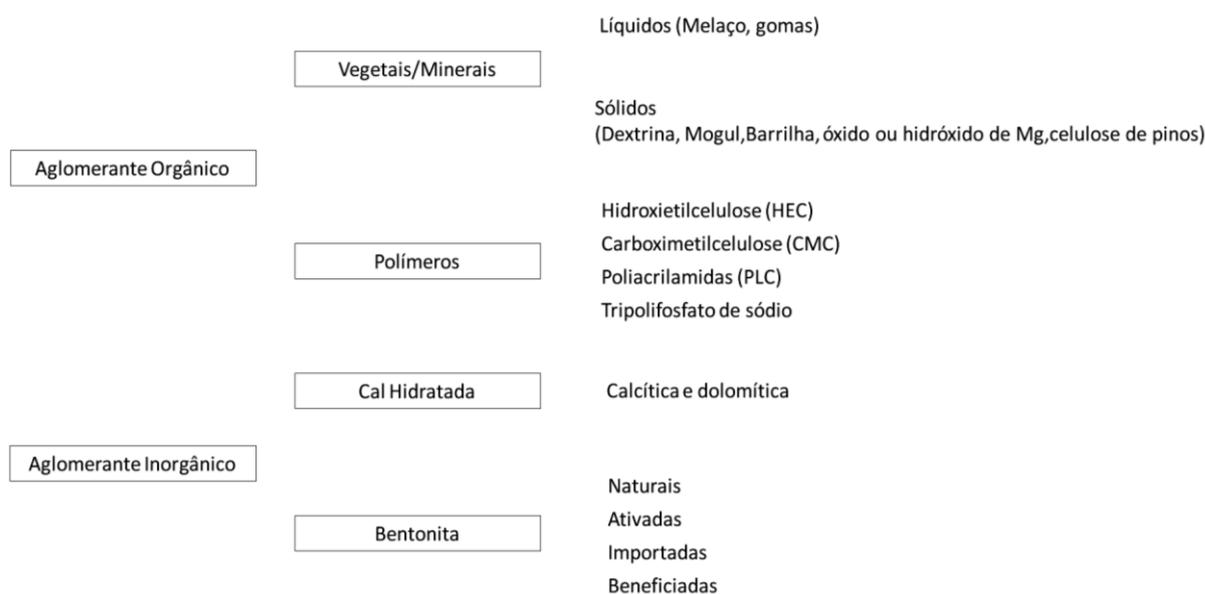
**Figura 17** - Classificação dos aglomerantes



Fonte : Effting, 2014

A figura 18 mostra os aglomerantes utilizados em processos a frio pelotização e briquetagem.

**Figura 18** – Materiais usados em processos de aglomeração a frio na metalurgia



Fonte: Mendonça, 1983

A Tabela 4 - Mostra os aglomerantes ou ligantes e aditivos utilizados até então na produção de aglomerados a frio, não variando muito, após 1990.

### 3.1.3.5 - Aglomerantes usados em briquetagem

Classicamente um aglomerado a frio é obtido com a adição aos sólidos de quantidade adequada de água, que gera uma tensão que mantém os grãos minerais coesos, permitindo assim, seu manuseio. Esta tensão, no entanto, não é suficiente para manter a coesão de grãos de material tão denso quanto o ferro. Além disto, quando este aglomerado é aquecido e ocorre a vaporização da água, a pelota ou briquete tende a se desintegrar. Para prevenir tais efeitos são acrescentados certos reagentes que visam: permitir a moldabilidade e trabalhabilidade da mistura; aumentar a resistência antes do aquecimento (resistência “a verde”) e manuseabilidade para o transporte e estocagem; evitar o colapso dos aglomerados nas etapas iniciais do aquecimento, quando o grande volume de gases gerado pela vaporização da água, tende a destruir o mesmo. (Lima, 1994) A Tabela 5 mostra os principais materiais empregados em aglomeração a frio.

**Tabela 4 - Evolução do uso de ligantes e aditivos na aglomeração a frio**

| Aditivos            | Ano (Período)    |                                |                               |       |                      |                                  |                                                      |       |       |             |    |
|---------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|----------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|-------|-------|-------------|----|
|                     | 1970/77          | 1978                           | 1979                          | 1980  | 1981                 | 1982                             | 1983                                                 | 1984  | 1985  | 1986 à 1990 |    |
|                     | HL               | HL<br>Be<br>Ls<br>DL           | HL , Be , Ls ,<br>DL , Ch     |       |                      | HL<br>Be<br>Ls<br>DL<br>Ch<br>SB | HL , Be, Ls , DL ,<br>SL , Ch , Co , Du ,<br>Mg , SB |       |       | HL          | Be |
|                     |                  |                                |                               |       |                      |                                  |                                                      |       |       | Ls          | DL |
| Análise Química (%) |                  |                                |                               |       | Análise Imediata (%) |                                  |                                                      |       |       |             |    |
|                     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO                  | PPC                              | Mn                                                   | CF    | MV    | CZ          |    |
| HL                  | 1,10             | -                              | 0,92                          | 73,46 | 0,40                 | 23,65                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| Be                  | 55,10            | 23,10                          | -                             | 2,38  | 2,12                 | 15,27                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| Ls                  | 2,47             | -                              | 0,34                          | 48,77 | 5,27                 | 42,31                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| DL                  | 2,70             | -                              | 0,18                          | 37,52 | 15,06                | 43,64                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| SL                  | 2,04             | -                              | 0,20                          | 43,18 | 10,08                | 43,10                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| Ch                  | 30,94            | 2,91                           | -                             | 9,90  | 1,22                 | -                                | -                                                    | 57,07 | 25,77 | 17,16       |    |
| Co                  | 57,00            | 2,52                           | -                             | 2,52  | 0,60                 | -                                | -                                                    | 50,07 | 31,21 | 18,72       |    |
| An                  | 44,87            | 26,75                          | -                             | 5,12  | 0,67                 | -                                | -                                                    | 72,22 | 10,63 | 17,15       |    |
| CB                  | 14,70            | 3,95                           | -                             | 25,25 | 3,47                 | -                                | -                                                    | 79,54 | 8,08  | 12,38       |    |
| Du                  | 38,50            | -                              | 13,00                         | 2,80  | 33,28                | 12,77                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| Mg                  | 0,70             | -                              | 1,46                          | 1,12  | 46,75                | 49,53                            | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| SB                  | -                | -                              | -                             | -     | -                    | -                                | -                                                    | -     | -     | -           |    |
| Mn                  | 1,17             | 1,95                           | -                             | 0,07  | 0,08                 | 12,53                            | 29,10                                                | -     | -     | -           |    |

HL – Cal Hidratada , Be – Bentonita , Ls – Calcário , DL – Dolomita , SL – Calcário Especial , Ch – Carvão Vegetal , Co – Carvão Mineral , An – Antracito , CB – Coke Breeze , Du – Dunito , Mg – Magnesita , SB – Aglomerante Sintético , Mn – Minério de Mangânes , CF – Carbono Fixo , MV – Matéria Volátil , CZ - Cinza

Fonte : Mourão, 1992

**Tabela 5** - Matérias primas utilizadas em aglomeração a frio

| <b>Matérias-Primas</b>                 | <b>Em uso</b>                                  | <b>Testadas no passado</b>                     |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Minério de ferro e produtos carbonosos | Mais de 20 tipos (SiO <sub>2</sub> = 0,5 à 6%) | Minério de manganês até 30%                    |
| Fundentes                              | Calcários calcíticos e dolimíticos             | Magnesita e dunito                             |
| Aglomerantes                           | Cal hidratada, bentonita                       | Dextrina, materiais orgânicos                  |
| Combustíveis sólidos                   | Antracito                                      | Coke breeze, carvão vegetal, coque de petróleo |

Fonte: Silva, 2013

O ligante clássico é a bentonita, que é uma argila e tem como vantagem baixo custo (quando ordinária), confere alta moldabilidade, boa resistência a verde e estabilidade, mesmo em altas temperaturas. Apresenta, no entanto, alguns inconvenientes, quais sejam: tem um impacto no custo final do produto (ferro ou aço) significativo (Figura 19), é um recurso natural em que sua extração agride o meio ambiente, o seu custo pode ser elevado quando é importada ou beneficiada, a quantidade a ser utilizada é relativamente grande (da ordem de 0,5 à 1% mínimo em peso, de 5 - 6 kg/t de mistura) e deixa resíduo característico das argilas: sílica e alumínio, principalmente, que tem que ser escorificados, diminuindo portanto o volume útil do forno e atrapalhando o processo de redução. (Mourão, 1992). Cassola (1999) após o estudo de vários aglomerantes afirma que qualquer material ligante em pó usado em briquetagem (estando neste grupo a bentonita) é adicionado em teor médio de 2%, Junca (2011) também reforça o afirmado. Kaminski (2011) em seu trabalho utiliza 4% para qualquer aglomerante. Fontes (1989), também após testes, comenta que os teores de ligantes finos, devem ser mais elevados entre 5 à 12%. No caso específico do uso de bentonita, LURY (1997), afirma que o teor ótimo gira entorno de 2 a 4%, porém ZAFRA (2004) cita que deve ser de 3 a 6%, Gislou (2006) e colaboradores também empregaram estas porcentagens.

O amido de milho empregado em teores de 6 à 10% também é um ligante (tipo pó fino seco) considerado clássico para o uso em briquetagem a frio. (Fontes, 1984).

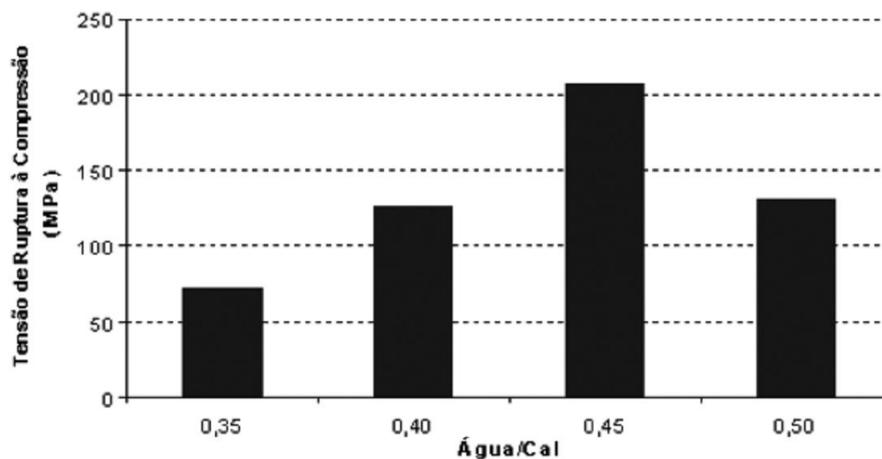
**Figura 19 - Participação no Custo Final do Aço**

| <b>As 100 maiores no valor em cada bem mineral</b> |                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Participação no valor do bem</b>                | <b>Bem Mineral</b>                                                                                                                                |
| <b>100%</b>                                        | Amianto, Barita, Bauxita, Cobre, Carbonato de Cálcio, Fertilizantes Potássicos, Magnesita, Níquel, Pirocloro, Salgema, Titânio, Zirconita, Lítio. |
| <b>99%-90%</b>                                     | Cassiterita, Ferro, Grafita, Manganês, Rocha Fosfática, Zinco.                                                                                    |
| <b>89%-70%</b>                                     | Carvão, Fluorita, Ouro, Prata, Cromita, Caulim                                                                                                    |
| <b>69%-50%</b>                                     | Calcário, Bentonita                                                                                                                               |
| <b>49%-25%</b>                                     | Gipsita, Sal Marinho.                                                                                                                             |
| <b>Menos de 25%</b>                                | Areia, Argila, Brita, Talco, Rochas Ornamentais.                                                                                                  |

Fonte: Baptista, 2013

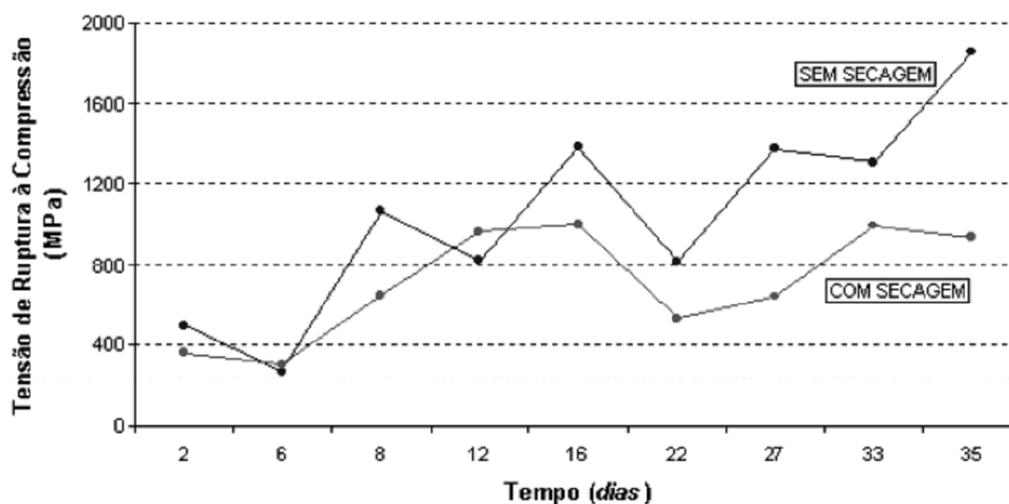
Outros ligantes que normalmente se utiliza são: Cimento em teores de 3 à 8%. Cal na quantidade de até 2,5% (25Kg/t mistura, varia entre 20 à 30 Kg) e dolomita e/ou calcário 1,5 à 1,70%. (Nonato, 2007). As figuras 20 e 21 mostram que existe uma relação ótima entre a quantidade de água e de cal para se alcançar uma boa resistência do aglomerado a frio. (D'Abreu, 2004).

**Figura 20 – Resistência de briquetes com cal hidratada como aglomerante moldados sem pressão, em função da relação água/cal.**



Fonte: D'Abreu, 2004

**Figura 21** – Resistência à compressão dos briquetes aglomerados com cal hidratada, curados ao ar, moldados com pressão relação Água/Cal = 0,15



Fonte: D'Abreu, 2004

Os reagentes orgânicos (composto polimérico Peridur (CMC - Carboximetilcelulose), Alcotac (PAM - Poliacrilamida) e Carbinder (HEC - Hidroxietilcelulose) destacam-se por apresentarem como principais vantagens a quantidade a ser acrescida no aglomerado ser significativamente menor (da ordem de 5 a 10 vezes menor, 0,035 – 0,060% ou 0,35-0,60kg/t mist), produz uma mistura altamente homogênea, não deixam resíduos, pois em altas temperaturas estes reagentes são totalmente volatilizados não gerando resíduos poluentes, tem suas propriedades definidas pelo controle das condições de produção. As principais desvantagens destes ligantes são a baixa resistência em altas temperaturas, mesmo com baixa dosagem o custo unitário é alto e são produtos industriais, consumindo matéria-prima, processo, gerando resíduos e impactos ambientais. (Nonato,2007)

### 3.1.3.6 – USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGLOMERANTE (Co-Produto)

A escória de aciaria é resultado da interação do aço líquido com refratário do forno, com a atmosfera, com as adições de ligas, fundentes e fluxantes, com o oxigênio injetado e da combinação dos elementos que fazem parte de sua composição química. (Lobato, 2013)

Com o grande crescimento, em escala mundial, das indústrias e a crescente busca, na atualidade, do desenvolvimento em bases auto-sustentáveis, tornou-se

imperioso o reaproveitamento dos materiais oriundos dos mais variados processos industriais. Tendo em vista a necessidade de promover sua sustentabilidade, a indústria siderúrgica passou a buscar destinação para os seus co-produtos, como as escórias. Mendonça, 2006 abm61

Rocha (2005) estudando este material mostra que o mesmo pode ser utilizado como co-produto, desde que seja bem controlada as suas características.

Na Figura 22 mostra a gama de aplicação deste co-produto e na Figura 23 vê-se o uso da escória de acordo com o processo de beneficiamento.

**Figura 22 - Aplicações diversas da escória de aciaria**

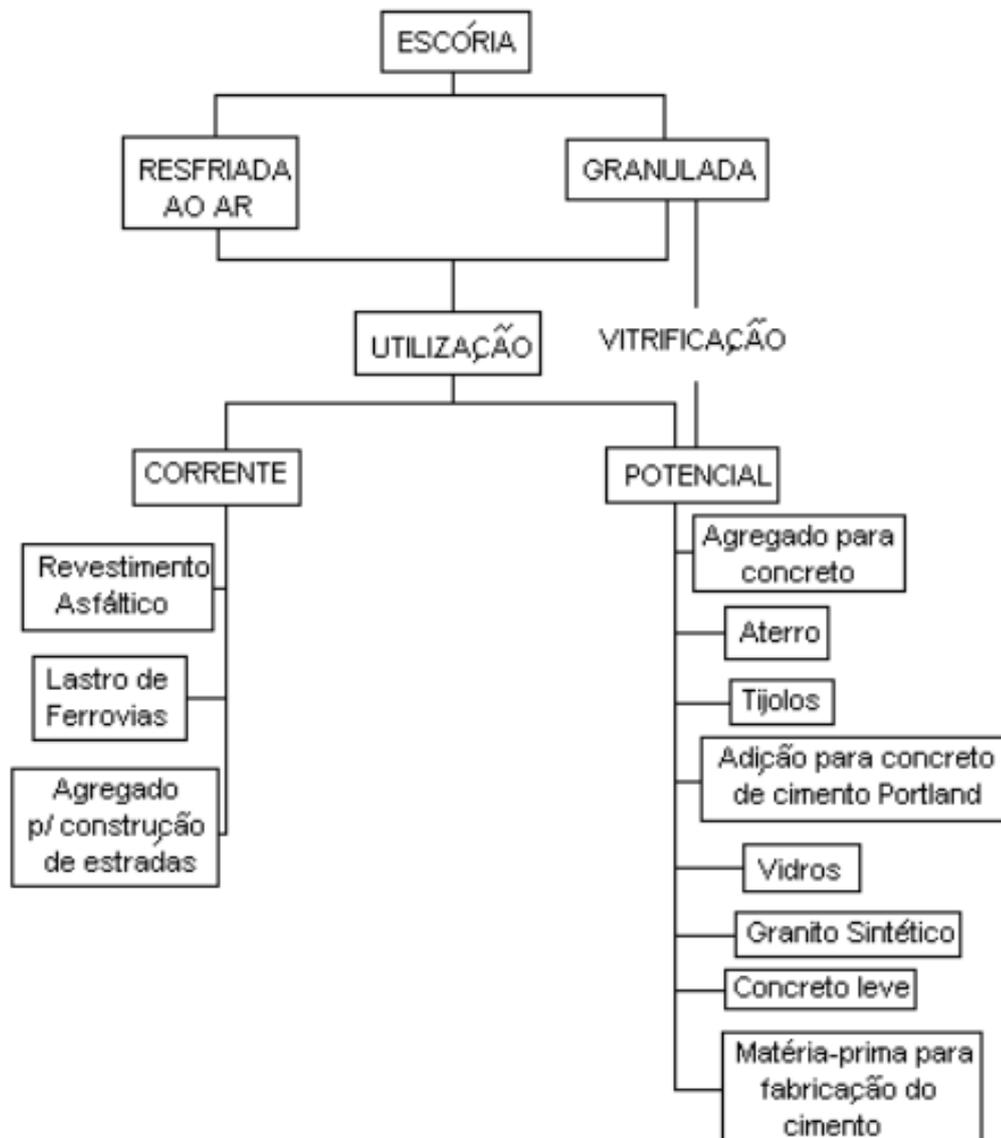


Fonte: Faria, 2007

Como a escória tem um poder de ligante vale apenas fazer um paralelo entre a sua estrutura e a dos componentes principais do Cimento Portland. O cimento é um produto que possui elementos ou constituinte combinados, formando compostos complexos, que apresentam a propriedade de se combinarem com água, como pode ser visto na Figura 24 (Pinto Junior, 2012).

Pinto Junior (2012) destaca que para um resíduo ser considerado adequado na reciclagem como material cimentício ou pozolânico deve: ser solúvel em água; ter Ca, Si, Al, como elementos predominantes; estar presente na forma granular, preferencialmente com elevada superfície específica; ter preferencialmente elevado conteúdo vítreo.

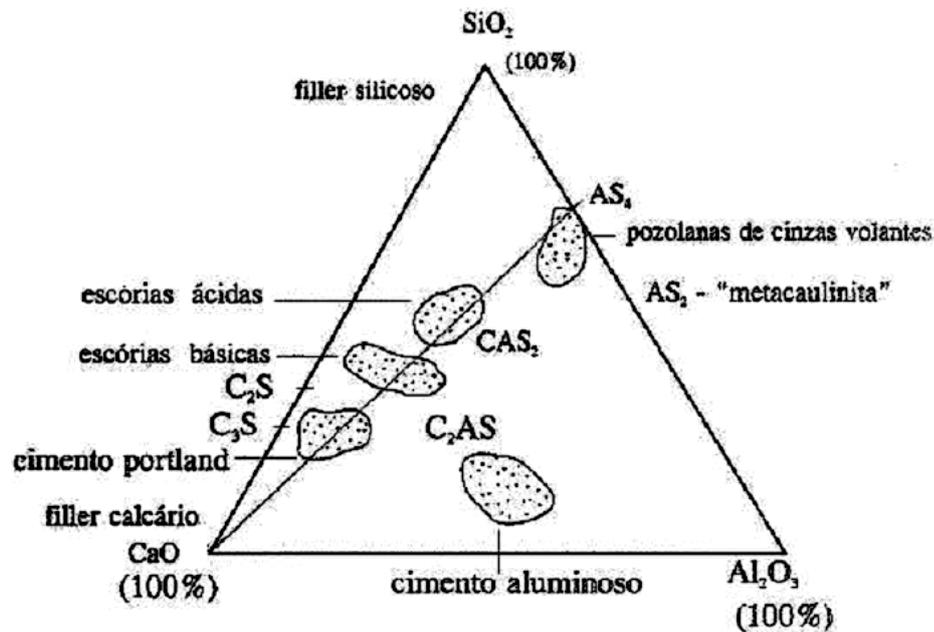
**Figura 23** – Uso corrente e usos potenciais da escória de aciaria de acordo com o resfriamento empregado.



Fonte: Faria, 2007

De acordo com este mesmo autor, o uso de uma escória como aglomerante de pega úmida é influenciada principalmente pela: composição química, reatividade, atividade pozolânica e hidráulica, composição mineralógica; finura; efeito filler, ação coloidal, grau de vitrificação.

**Figura 24** – Diagrama ternário CaO-SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com as faixas composicionais do cimento Portland e materiais afins



Fonte Pinto Junior, 2012

As escórias de uma maneira geral são constituídas por óxidos, como sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de manganês (MgO) e óxido de ferro (FeO), além de silicatos como FeO.SiO<sub>2</sub>, MnO.SiO<sub>2</sub> e CaO.SiO<sub>2</sub>. Quimicamente, a escória é uma mistura de cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, mas não nas mesmas proporções (Tabela 6). (Lobato, 2013)

**Tabela 6** – Composição química típica das escórias de alto-forno, aciaria e do cimento

|                                | Escória de alto-forno (%) | Escória de aciaria (%) | Cimento (%) |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------|
| CaO                            | 24 - 45                   | 6 - 45                 | 61 - 67     |
| SiO <sub>2</sub>               | 30 - 55                   | 7 - 16                 | 20 - 23     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8 - 19                    | 1 - 4                  | 4,5 - 7     |
| MgO                            | 1,5 - 9                   | 1 - 9                  | 0,8 - 6     |

Fonte: Lobato (2013)

Na Tabela 7 pode se ver as principais características da escória de aciaria em comparação com o clínquer e cimento Portland e a escória de alto forno

**Tabela 7** – Comparação das características do clínquer Portland a do Cimento Portland em relação à escória de alto-forno e de aciaria.

| Produto                      | Características principais e composição                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Clínquer de cimento Portland | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_3S</math>, <math>C_2S</math>, <math>C_3A</math>, <math>C_4AF</math></li> <li>• Elevada atividade hidráulica</li> </ul>                                                                                                                                          |
| Cimento Portland             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_3S</math>, <math>C_2S</math>, <math>C_3A</math>, <math>C_4AF</math> + Sulfatos</li> <li>• Elevada atividade hidráulica</li> </ul>                                                                                                                               |
| Escória de alto forno        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Totalmente vítrea</li> <li>• Óxidos : <math>SiO_2</math>, <math>CaO</math>, <math>Fe_2O_3</math>, <math>Al_2O_3</math></li> <li>• Reativa desde que sejam utilizados ativadores como a Cal (<math>CaO</math> - do cimento Portland), silicatos e carbonatos.</li> </ul> |
| Escória de aciaria (LD)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tem suas características ligantes ativadas mediante ao controle da composição no conversor, do tipo de resfriamento e executando uma moagem fina</li> </ul>                                                                                                             |

Fonte: Pinto Junior, 2012

### 3.1.3.6.1 - Fatores que determinam o uso da escória de aciaria como aglomerante: Composição Química, Reatividade Química, Atividade Pozolanica e Hidraulicidade

*Composição química:* A composição química da escória de aciaria é semelhante à encontrada no cimento Portland (silício, alumínio, ferro, cálcio, entre outros), porém a quantidade dos óxidos formados por esses elementos químicos difere substancialmente. (Polisseni, 2005).

Um fato que se deve destacar é que, enquanto a escória de alto-forno que é normalmente empregada na produção de cimento contém em média 17 (dezessete) constituintes minerais principais a escória de aços contém em média 35 (trinta e cinco), além disso, pode-se afirmar que existem minerais comuns encontrados tanto na escória de alto-forno como também estão presentes na escória de aciaria. (Arrivabene, 2012)

Polese (2006) ABM61 comparou as escória de LD (aciaria à oxigênio) com escória de FEA (aciaria elétrica) e constatou que praticamente são idênticas em termos de constituintes.

*Reatividade química:* A reatividade da escória que é a característica fundamental que permite o seu emprego como aglomerante, depende da composição química e da finura. Pode-se então avaliar esta reatividade ou hidraulicidade (capacidade ligante ou aglomerante) através da basicidade, este método faz uma correlação dos índices de basicidade já consagrados com a capacidade de aglomeração das escórias ou módulos químicos, como visto nas equações (PINTO JUNIOR, 2012).

$$\text{Binária : } \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \quad \text{Equação (5)}$$

$$\text{Terciária : } \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{\text{SiO}_2} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\text{Quaternária : } \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)} \quad \text{Equação (7)}$$

A norma Européia UNE 83480EX também mostra a avaliação das escórias moídas finamente e empregadas como aglomerante de pega úmida através dos índices químicos mostrados nas equações 8, 9 e 10. (Geyer, 2001)

$$\frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{\text{SiO}_2} > 1 \quad \text{Equação (8)}$$

$$\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 > 325 \quad \text{Equação (9)}$$

$$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 \geq 67 \quad \text{Equação (10)}$$

A atividade hidráulica das escórias cresce com o aumento da relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  e também é regida pela relação  $(\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{FeO} + \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3)$  (PINTO JUNIOR, 2012).

De acordo com Arrivabene (2012) a capacidade aglomerante/ligante, a reatividade hidráulica, depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória. Que pode ser calculado empregando a relação abaixo:

$$F = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \quad \text{Equação (11)}$$

Se  $F < 1$ , a escória é considerada ácida e sua hidraulicidade é baixa

Se  $F > 1$ , a escória é considerada básica e sua hidraulicidade é boa

A reatividade da escoria de aciaria, que se traduz em capacidade ligante (aglomerante de pega umida) também pode ser calculada com base na composição química e utilizando-se de alguns parâmetros, citados abaixo por Arrivabene (2012). Os resultados atendem o mesmo limite estipulado pela norma ABNT 5735.

- Aplicando-se a norma alemã DIN 1164:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3} \geq 1 \quad \text{Equação (12)}$$

- Aplicando a metodologia de Dron:

$$\frac{\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)^2} \geq 0,18 \quad \text{Equação (13)}$$

Para a utilização da escória de aciaria como matéria-prima para a aglomeração de finos de matérias-primas siderúrgicas, Machado (2000) cita que, neste sentido, existem os módulos que precisam ser considerados, tais como: módulo de saturação de cal (CaO) (LSF), de sílica (SR) e de alumina ou alumino-férrico (AR) , de acordo com as relações mostradas nas equações 14, 15, 16 a seguir :

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{(2,8 \text{SiO}_2 + 1,2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad \text{Equação (14)}$$

$$SR = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)} \quad \text{Equação (15)}$$

$$AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad \text{Equação (16)}$$

Segundo Machado (2000), alguns autores consideram que os valores de (LSF) podem variar de 0,92 a 0,98 o de (SR) de 2,0 a 3,0, o de (AR) de 1,0 a 4,0, e para outros, o módulo de sílica ou de silício deve girar em torno de 2,10 e o módulo alomino-férrico entre 2,5 (1,5 mínimo).

Carpio (2005) cita que existe também o Fator de saturação de cal.

$$FSC = \frac{100 \text{ CaO}}{(2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3)} \quad \text{Equação (17)}$$

Seu valor ótimo se encontra entre 90 e 100 % em peso, este módulo determina a quantidade máxima de CaO que pode reagir com os outros óxidos.

Atividade Pozolanica: Polisseni (2005) destaca que qualquer material com características pozolânicas (ter a capacidade de colar como cimento), mesmo que com baixo índice de atividade pozolânica, é denominado de material cimentício que detem a capacidade de encapsuladores de resíduos, e se enquadra na classe de aglomerantes.

A norma brasileira ABNT 12653 (Tabela 8) estabelece que para ser considerada como material pozolânico a adição deve atender a um índice de no mínimo 50% (como resultado) em relação ao somatório dos óxidos ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) (Geyer, 2001)

Masuero (1995), já afirmava que as escórias siderúrgicas podem ser usadas na construção civil como elemento cimentante.

Assim, as escórias de aciaria LD (MRPL) podem ser consideradas como materiais cimentantes/aglomerantes a frio de pega úmida e cura natural (como a bentonita). (Gumieri, 2002).

**Tabela 8** – Exigência química para classificar um material como pozolânico, de acordo com a norma ABNT 12653

| Exigência Química                                                   | Classe de material pozolânico |    |    |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|
|                                                                     | N                             | C  | E  |
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO<br>(% min.) | 70                            | 70 | 50 |

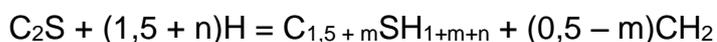
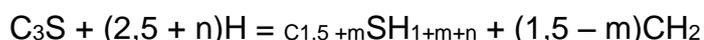
Fonte : Gumieri, 2002

Classe N = pozolanas naturais e artificiais

Classe C = cinza volante

Classe E = qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores

O comportamento cimentante das escórias de fabricação de aço é confirmado por Takano (1996) que relata que os materiais cimentantes apresentam predominantemente uma estrutura iônica e portanto é bem solúvel em água, formando um produto do tipo gel (C-S-H) seguido por precipitação de CH<sub>2</sub>. Estas reações são as básicas para proporcionar o endurecimento de materiais aglomerados a frio. As reações típicas são as seguintes:

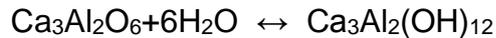


Onde: C=CaO; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; S=SiO<sub>2</sub>; H=H<sub>2</sub>O

Reis (2008) também relata a condição de material aglomerante cimentítico da escória de aço, citando que ocorre um endurecimento devido a formação ou hidratação de silicatos já existentes e existem basicamente dois tipos de processos que levam à formação de compostos que ajudam a aumentar a resistência dos aglomerados a frio. O primeiro seria baseado nos efeitos de aglomeração exercidos pela cal e sílica, onde o endurecimento é o resultado da formação de silicatos de cálcio hidratados, dados pela reação:



O segundo baseia-se no fato da aglomeração se processar em virtude dos aluminatos e silicatos sofrerem hidratação, como as reações a seguir:



Nessas reações os produtos hidratados são menos solúveis, portanto, na presença de água as reações acima são realmente de dissolução e precipitação, isto é, a saturação da solução pela formação contínua da fase CSH –  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , resulta na sua precipitação sobre as partículas das matérias-primas principais aglomerando-as firmemente. Na presença de CaO, o hidróxido de cálcio reage inicialmente com os constituintes ácidos da ganga, formando uma matriz entre os grãos de óxido de ferro. O  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tem uma influência positiva sobre a resistência à compressão dos aglomerados verdes e curados. Este efeito é atribuído a sua capacidade de se dispersar em pequenas partículas na presença de uma umidade média, aumentando o contato entre os grãos. (Reis, 2008)

Os produtos de hidratação da escória são similares aos encontrados em pastas hidratadas de cimento, entretanto há uma alteração nas relações \*C/S (do C-S-H) e \*C/A, respectivamente \*C/S – Hidróxido de cálcio e sílica e \*C/A – Hidróxido de cálcio e alumina (Faria, 2007)

Também ocorre, na escória após sua hidratação, a presença das fases mineralógicas Akermanita ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) e Gehlenita ( $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ), que são consideradas como as fases mineralógicas ideais para a atividade hidráulica das escórias, garantem endurecimento após cura e que possui elevada estabilidade a quente, não permitindo que o material inche ou degrade nos fornos de redução. (Faria, 2007).

A presença destas fases que se hidratam e passam a ter propriedades cimentícias é que permite o uso da escoria de aciaria como aglomerante.

*Índice de Hidraulicidade, Módulo Hidráulico e Índice de Vicat:* Somente a composição química da escoria não é suficiente para se determinar sua reatividade,

existem outros elementos que a influenciam, tais como estrutura, granulometria, tipos de defeitos na estrutura, porcentagem de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , valor da basicidade, quantidade da fase vítrea, quantidade de poros (Arrivabene, 2012). Como a forma de resfriamento da escória líquida altera suas propriedades, fez-se o cálculo de seu índice de hidraulicidade, aplicando-se três metodologias distintas:

$$\frac{\% \text{CaO}}{(\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3)} \quad \text{Equação (18)}$$

$$\frac{\% \text{CaO}}{(\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5)} \quad \text{Equação (19)}$$

$$\frac{(\text{CaO} + \% \text{MgO})}{(\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5)} \quad \text{Equação (20)}$$

Geyer (1994) cita outros índices para avaliação da qualidade das escórias :

- Índice de Hidraulicidade de Cheron e Lardinois :

$$C = \frac{(\text{CaO} + 1.4 \text{MgO} + 0,56 \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{SiO}_2} \quad \text{Equação (21)}$$

Recomenda-se valores de  $C > 1$

- Índice de Langavant :

$$L = 20 + \text{CaO} + \frac{1}{2} \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 2 \text{SiO}_2 \quad \text{Equação (22)}$$

Para valores de  $L > 16$ : escória de boa qualidade

Para valores entre  $12 < L < 16$  : escória de média qualidade

Para valores de  $L < 12$  : escória ruim

- Índice de Blondiau :

$$B = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \quad 1,45 < B < 1,54 \quad \text{Equação (23)}$$

$$B1 = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad 1,8 < B1 < 1,9 \quad \text{Equação (24)}$$

- *Módulo hidráulico* :

Carpio (2005) cita em seu estudo, que este poder aglomerante das escórias de aciaria é definido como módulo hidráulico, e este módulo tem uma relação similar ao fator de saturação de cal. Sendo que, atualmente, o seu valor se encontra entre 1,8 e 2,2, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Equação (25)

- *Índice Hidráulico ou de Vicat* :

Carpio (2005) também comenta que a hidraulicidade de um composto aglomerante com características cimentícias poder ser avaliada utilizando-se do índice hidráulico ou presa da cal hidráulica, reportando-se ao poder ligante das cais, como mostrado na equação seguinte:

$$\text{índice hidráulico} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

Equação (26)

A **Tabela 9** mostra a aplicação do índice de Vicat.

| <b>Produto</b>                 | <b>Índice Hidráulico</b> |
|--------------------------------|--------------------------|
| Cais aéreas                    | 0,0 – 0,10               |
| Cais francamente hidráulicas   | 0,10 – 0,16              |
| Cais medianamente hidráulicas  | 0,16 – 0,31              |
| Cais propriamente hidráulicas  | 0,31 – 0,42              |
| Cais eminentemente hidráulicas | 0,42 – 0,50              |
| Cais limites                   | 0,50 – 0,65              |

### 3.1.3.7- O Processo de Briquetagem (Compactação)

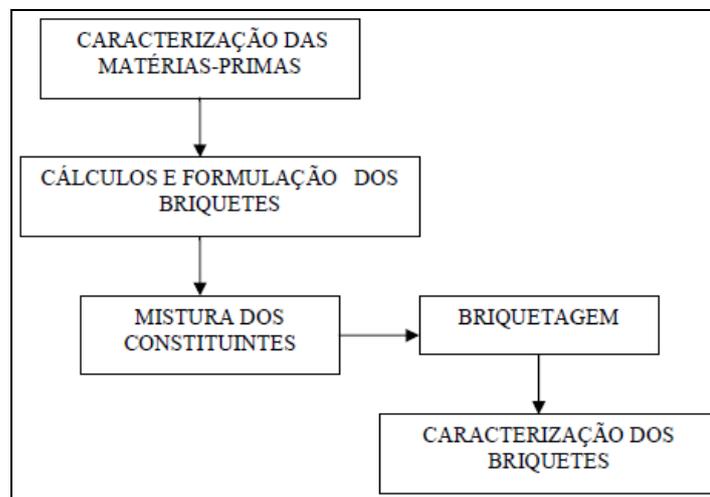
Os processos de compactação são classificados em duas categorias principais: compactação a quente em alta pressão (CQ) e a compactação fria a baixa pressão (CF). De acordo com o processo de briquetagem os briquetes foram então classificados em tipo E (estrudados), P (prensados) e C (compactados). Monoconstituídos (um só constituinte), Bi-compostos (dois) e Multiconstituídos. Auto-

redutores (minério e carvões, coque ou biomassa) e Auto-fundente (minério e calcário ou dolomita com carga redutora ou não), conforme propõe Oliveira (2013).

### 3.1.3.8 - Etapas do Processo de Briquetagem

Conforme citação de Borghi (2012), esclarece que os processos de briquetagem em geral possuem as seguintes fases: escolha do material, secagem da mistura, moagem dos resíduos, peneiramento, mistura com aglutinante, prensagem, secagem do briquete, tratamento térmico (queima ou cura), estocagem e embalagem. A Figura 25 ilustra este processo.

**Figura 25** - Fluxograma da metodologia industrial de confecção dos briquetes



Fonte: Borghi (2012)

### 3.1.3.9 - Aspecto Físico e Dimensões dos Briquetes

Conforme a sua forma são denominados tipo C (cilíndrico), T (travesseiro) e S (sextavado). Na Figura 26 pode-se ver estes formatos citados por (Lemos, 2015).

**Figura 26** - Formas de briquetes



Para uso geral um briquete possui diâmetro entre 30 -70 mm (média um diâmetro a partir de 50 mm). Pode alcançar diâmetros até 120-130 mm nos equipamentos industriais. Comprimento pode variar de 15 a 400 mm, sendo que em média é de 50-100 mm.

O diâmetro ideal dos briquetes para queima em caldeiras, fornos e lareiras é de 70 mm a 100 mm, com comprimento de 250 a 400 mm

Outras dimensões (diâmetro de 28 a 65 mm) são usadas em estufas, fogões com alimentação automática, grelhas, churrasqueiras etc. Um consenso entre produtores e usuários é de que um briquete com 4,5 cm de altura por 3,0 cm de diâmetro pode ser empregado em vários seguimentos. (Borghini, 2012).

## **3.2 - EXIGÊNCIAS PARA APLICAÇÃO DE BRIQUETES EM FORNOS SIDERÚRGICOS**

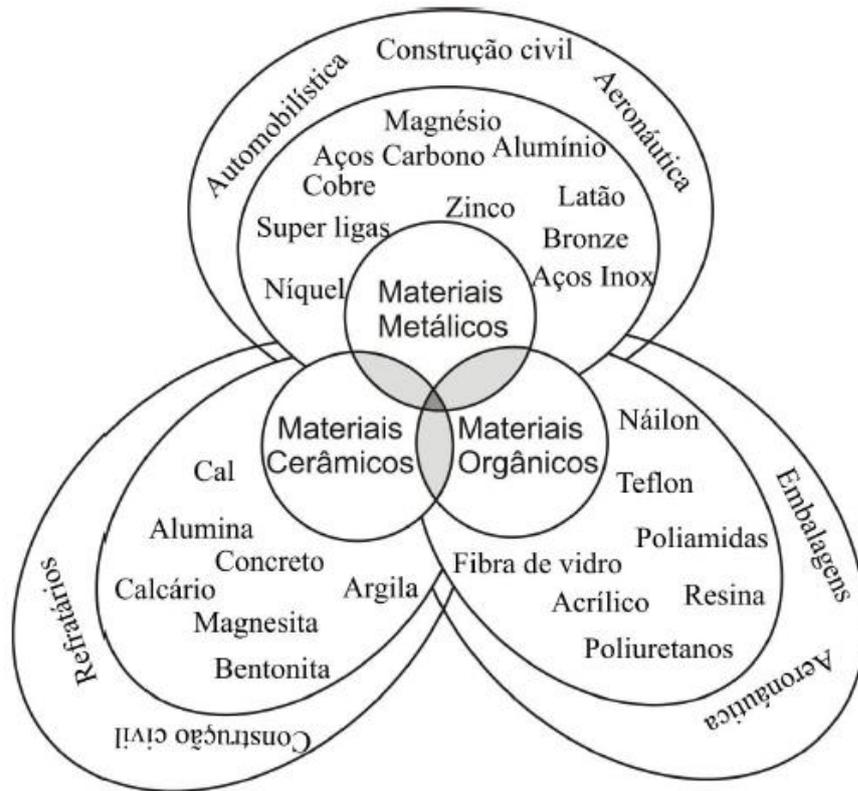
### **3.2.1 - Classificação e Escolha da Matéria Prima**

Os materiais de modo geral (Figuras 27 e 28) são fabricados a partir de matérias-primas classificadas em: Naturais (não submetidas a tratamentos de qualquer natureza); Sintéticas (obtidos através de processos múltiplos, a partir de sua fonte); Recicladas (provenientes do aproveitamento de resíduos, rejeitos ou descartes). (Filho, 2010)

A escolha da matéria-prima para a obtenção de um determinado produto dependerá dos seguintes requisitos: custo inicial do material, aceitação do mercado, da disponibilidade (extração, localização), do processo de fabricação, das exigências fundamentais de desempenho e preço do produto acabado. (Filho, 2010)

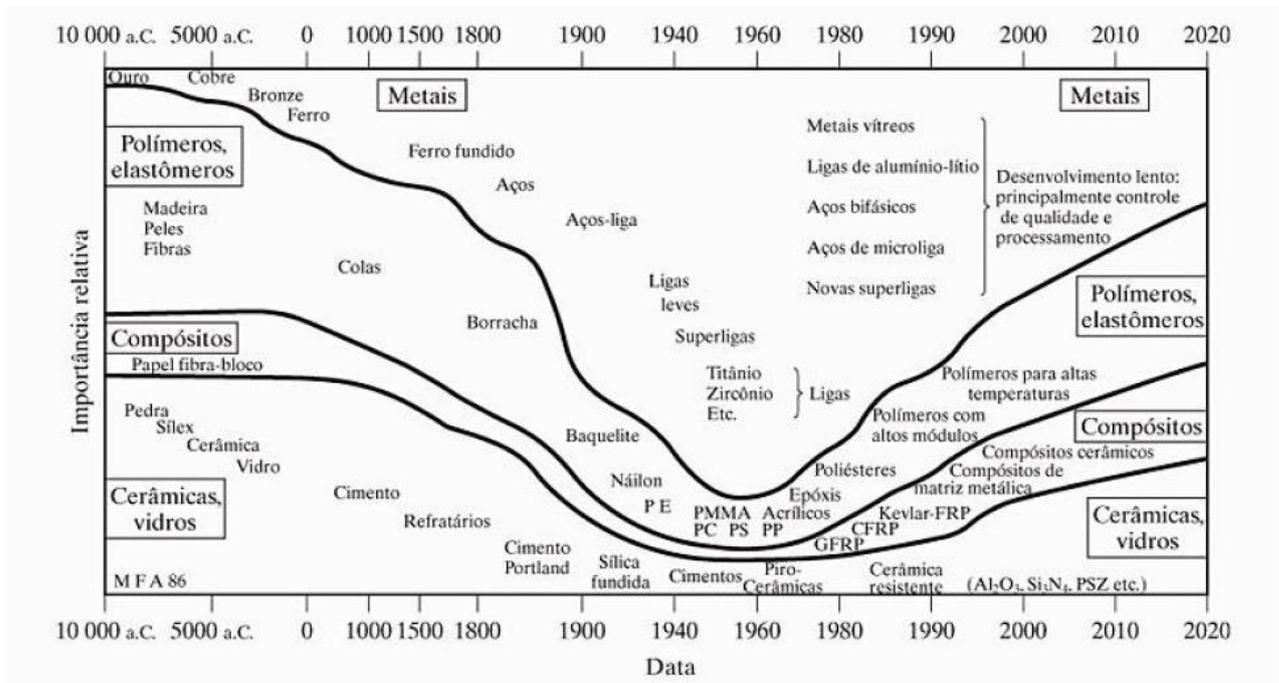
O minério de ferro pode ser utilizado somente depois de transformado em um dos “metais primários” ou “metálicos”, que podem ser: DRI ( *Direct Reduced Iron*) ou HBI ( *Hot Briquetted Iron* ) , ou seja, produtos de redução direta; eventualmente granulados de ferro, sinter, ferro-gusa ou, então, metal quente líquido. Outra forma de emprego esta nos aglomerados como pelotas ou tipo briquetes queimados ou de cura natural.(Sampaio, 1992) A Figura 29 mostra alguns exemplos de fontes de ferro sólidas não naturais.

Figura 27 – Os três grandes grupos de materiais



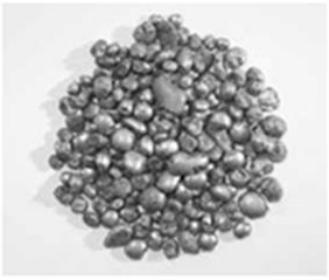
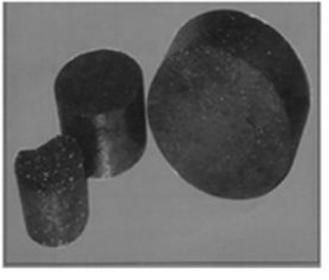
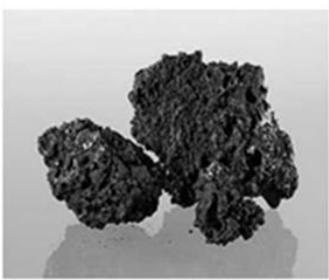
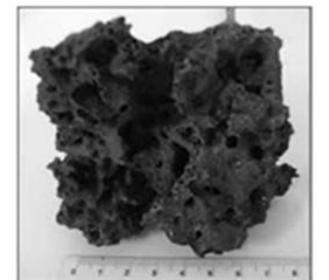
Fonte: Baptista, 2013

Figura 28 - Evolução dos materiais utilizados na fabricação de componentes



Fonte: Shackelford, 2008

**Figura 29** – Formas de fontes de ferro sólidas

|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |    |
| DRI<br>(briquete metálico a frio)                                                   | HBI<br>(briquete metálico a quente)                                                  | Metal em Gotas, nuggets<br>ou granulado                                               |
|    |    |    |
| Pão de gusa                                                                         | Briquetes cilíndricos<br>(curados)                                                   | Briquete tipo C<br>(compactado)                                                       |
|  |  |  |
| Pelotas<br>(queimadas ou<br>auto-redutoras)                                         | Sinter                                                                               | Ferro-esponja                                                                         |

Fonte : elaborado pelo autor

### 3.2.2 - Avaliação da qualidade dos briquetes

Os requisitos de qualidade para produtos aglomerados são: **(i)** composição química conforme as exigências dos reatores de redução, **(ii)** boa resistência à compressão diametral, **(iii)** boas propriedades de amolecimento e fusão, **(iv)** grande redutibilidade, **(v)** pequena porcentagem de contaminantes (P, Mn, V, Ti, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, Pb, Cr, Cu), **(vi)** pouca tendência a colagem, **(vii)** alta resistência

ao transporte e manuseio, **(viii)** tamanho adequado e uniforme (para manter a permeabilidade), **(ix)** pouca degradação e inchamento, **(x)** pequena desintegração em processo (Lemos, 2015).

A qualidade física e química da carga ferrífera alimentada nos fornos e principalmente no alto-forno são parâmetros de extrema relevância para uma boa marcha operacional do mesmo, fatos que norteiam o caminham no desenvolvimento de produtos na área de matérias-primas (Pereira, 2012).

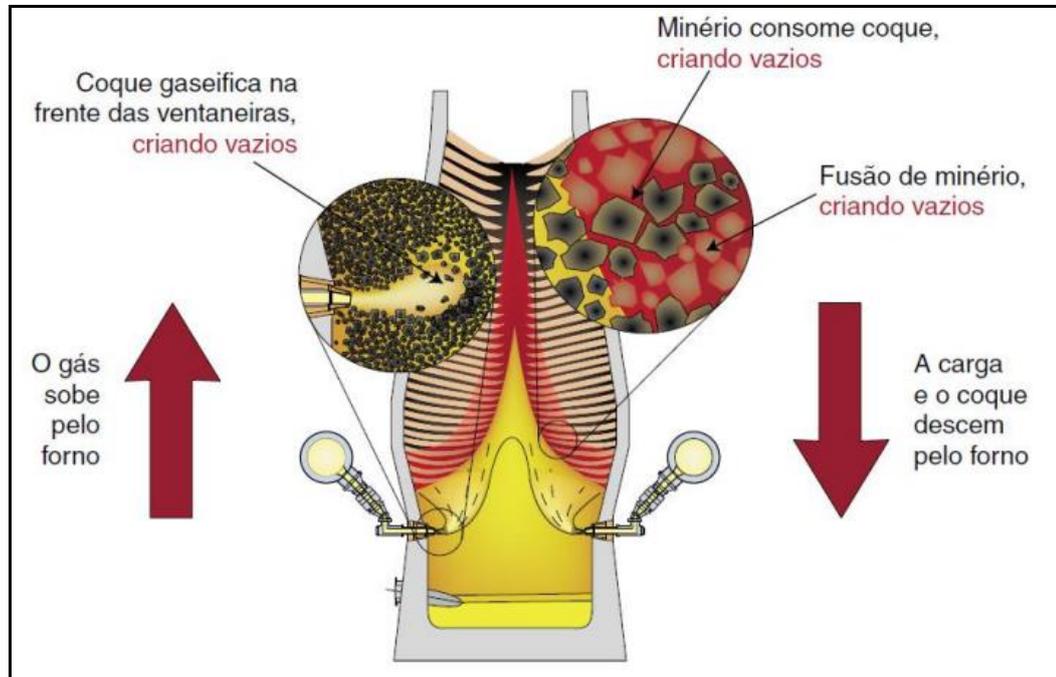
O alto-forno é um complexo reator metalúrgico que opera em contracorrente com a carga ferrífera (sinter, pelota, briquetes e minério de ferro) e termo-reductor (coque ou carvão vegetal), além dos elementos escorificantes, descendendo e os gases gerados internamente a esse reator, ascendendo. No seu interior ocorrem centenas de reações e estão presentes os três estados da matéria: sólidos, líquidos e gases. Neste reator ocorrem também grandes gradientes de temperatura. As matérias-primas comumente utilizadas no alto-forno são: matérias-primas preparadas (exemplo: sinter, coque, pelotas), matérias-primas naturais (minério de ferro granulado, carvão vegetal, calcário, dolomita, quartzo) e além de auxiliares (óleo combustível, alcatrão, carvão pulverizado, gás natural, plásticos picotados). Pode-se usar também sucata de ferro fundido e gusa sólido, quando se deseja aumentar o grau de metalização e diluir o enxofre e fósforo (Rosenqvist, 1986). A força que mantém suspensa a carga do alto-forno está ilustrada na Figura 30 (Maximiano, 2011).

A sua capacidade produtiva está relacionada diretamente ao volume interno do equipamento, que de uma maneira geral, pode ser, menor que  $1.500\text{m}^3$  é de pequeno porte, alto-forno com volume entre  $1.500\text{m}^3$  e  $3.000\text{m}^3$  é de médio porte e com volume acima de  $3.000\text{m}^3$ , é de grande porte. (Rizzo, 2005)

Elkasabgy e D'Abreu (1981) citam em seu artigo que com o desenvolvimento de altos-fornos cada vez maiores, fez esses equipamentos mais exigentes quanto às especificações da carga, e deste modo um parâmetro que se

tornou muito importante a considerar é o carregamento mecânico que sofre a matéria-prima.

**Figura 30** – Força impulsora de um alto forno



Fonte: Maximiano, 2011

Assim sendo, ensaios físicos tais como, tamboramento e queda, e ensaios metalúrgicos como índice de degradação sob redução (RDI), redutibilidade e crepitação, ponto de fusão e amolecimento, densidade e absorção de água, são ensaios usuais em uma usina siderúrgica integrada, objetivando a seleção das matérias-primas ferríferas a serem carregadas no alto-forno. Porém, a característica principal e a de maior importância de uma matéria prima para fornos metalúrgicos (e que deve ser visada primeiramente em detrimento das outras) é a resistência a compressão diametral (Rosenqvist, 1986).

O coque é o combustível usado em médios e grandes altos-fornos, enquanto que para os de pequeno porte, normalmente utiliza-se carvão vegetal. (Rizzo, 2005) A Tabela 10 mostra a diferença entre este dois fornos e a Tabela 11 mostra a diferença de propriedades entre estes dois combustíveis.

**Tabela 10** - Comparação entre alto-forno a carvão e a coque

|                   | Carvão vegetal                     | Coque                           |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Produção          | 20 a 1.200 t/dia                   | 2.000 a 12.000 t/dia            |
| Diâmetro cadinho  | 1,5 a 6 m                          | 8 a 14 m                        |
| Altura alto-forno | ~16 m                              | ~32 m                           |
| Regeneradores     | Cowpers e glendons                 | Cowpers                         |
| Produtividade     | 1,6 a 2 t/dm <sup>3</sup>          | >2 t/dm <sup>3</sup>            |
| Volume escória    | 100 a 150 kg/t gusa                | 250 a 300 kg/t gusa             |
| Gusa              | Fósforo alto                       | Enxofre alto                    |
| Carga metálica    | Pode ser 100% de minério granulado | Presença de sinter e /ou pelota |

Fonte: Maximiano, 2011

**Tabela 11** – Características do coque e carvão vegetal para fornos de redução

| QUALIDADE          | ITEM                      | UNIDADE            | CARVÃO VEGETAL | COQUE       |
|--------------------|---------------------------|--------------------|----------------|-------------|
| <b>QUÍMICA</b>     | Carbono Fixo              | %                  | 70 - 75        | 86 - 89     |
|                    | Matérias voláteis         |                    | 20 - 25        | 1 - 3       |
|                    | Cinzas                    |                    | 2 - 3          | 10 -12      |
|                    | Enxofre                   |                    | 0,03 – 0,10    | 0,45 – 0,70 |
| <b>FÍSICA</b>      | Resistência à compressão  | Kg/cm <sup>2</sup> | 10 - 80        | 130 - 160   |
|                    | Faixa granulométrica      | mm                 | 9 - 102        | 25 - 75     |
|                    | Densidade                 | t/m <sup>3</sup>   | 0,250          | 0,550       |
| <b>Metalúrgica</b> | Reatividade a 950°        | %                  | 60             | 15          |
|                    | Resistência após a reação | %                  | -              | 60          |
|                    | Densidade                 | (%)                | 100            | 30          |

Fonte: Maximiano, 2011

O coque, é a matéria-prima mais crítica do processo de alto-forno devido ao seu custo alto e às funções que desempenha dentro do forno. Como único material sólido na parte inferior do forno, sustenta a carga e dá permeabilidade à passagem de gases, metal e escória líquidos, devido a sua alta resistência mecânica

e a sua alta porosidade, fornece energia e produz os gases redutores para o processo, além de ser responsável também na carburação do ferro líquido. Nestas características, o coque é praticamente insubstituível, desta forma, quando se pretende desenvolver uma matéria prima sintética do tipo aglomerado, os requisitos de aplicação, entre eles o limite de resistência, que devem ser objetivados são os oferecidos pelo coque (Rosenqvist, 1986).

Segundo Telles (2009), qualquer matéria prima carregada no alto-forno deve ter uma resistência tal que suporte o peso de uma coluna de carga de 25 à 30 metros de material, no caso de fornos a coque e de 15 à 18 metros no caso de fornos a carvão vegetal.

Na Tabela 12 elaborada pelo autor desta dissertação de mestrado, com base nos dados encontrados na literatura consultada, encontram-se os valores de resistência das matérias primas usada na siderurgia, bem como de alguns briquetes.

Segundo o autor Tanaka (2014), a utilização de aglomerados, na forma de briquetes em altos-fornos, é promissora desde que as seguintes premissas sejam atendidas: facilitador da reação de redução, elevar a marcha e produtividade; possuir resistência mecânica suficiente para suportar seu carregamento no alto-forno, manter as características, a altas. A seleção de um bom aglomerante é um ponto estratégico para se atender as requisitos desta premissa.

O autor Maximiano (2011) afirmou em seu trabalho que, em termos qualitativos, definiu-se os seguintes requisitos para a carga metálica utilizada em alto-fornos: **(i)** Qualidade química: após redução e fusão, **(ii)** a qualidade do gusa e escória produzidos devem atender a uma determinada qualidade pré-estabelecida (e isso será determinado pela qualidade da carga enforada); **(iii)** permeabilidade para passagem dos gases: **(iv)** deverá ter boa resistência a degradação (resistência mecânica) e sem inchamento quando submetida a elevada temperatura; **(v)** propriedades de amolecimento e fusão (requer uma rápida transição entre a fase sólida e líquida); **(vi)** alta resistência mecânica à abrasão, queda e a compressão; **(vii)** alta porosidade e redutibilidade; **(viii)** granulometria e composição química constante ou controlada; **(ix)** ser livre de elementos químicos indesejáveis nos altos fornos; **(x)** custo de fabricação deve ser o mais baixo possível. Tais características estão plenamente contempladas no presente estudo.

**Tabela 12 - Valores de Resistência em MPa das Matérias Primas Extraídos da Literatura**

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Calcário (média/mínima) (2)                                                                      | 220        |
| Minério de Ferro (média/mínima) (2)                                                              | 190        |
| Sinter (média/mínima) (2)                                                                        | 170        |
| Pelota queimada (mínimo) (1) (2)                                                                 | 160        |
| <b>Coque (máximo) (2)</b>                                                                        | <b>180</b> |
| Carvão (2)                                                                                       | 80         |
| Briquete Tipo - C (médio) (3)                                                                    | 130        |
| Briquete de Manganês (4)                                                                         | 55         |
| Briquete Auto-Redutor com cimento AL-61 (6)                                                      | 7845       |
| Briquete Auto-Redutor com cal hidrata (6)                                                        | 235        |
| Briquete Auto-Redutor com cal hidrata estufados (6)                                              | 883        |
| Briquete Auto-Redutor com cal hidrata cura ao ar (6)                                             | 1765       |
| Briquete Minério de Ferro e Carvão Mineral (7)                                                   | 22         |
| Pelotas Autorredutoras (cimentos portland) (5)                                                   | 1000       |
| Kasai et al. Briquete (a frio) auto-redutor carvão mineral com cimento(7)                        | 880        |
| Kasai et al. Briquete (a quente) minério de ferro (7)                                            | 866        |
| Hegang (Man-Sheng et al.) briquete minério de ferro (7)                                          | 35         |
| Anyashiki et al. Briquete auto-redutor cimento e cal estufado (7)                                | 4000       |
| Tanaka et al. Briquete minério de ferro e coque com bentonita estufado (7)                       | 4470       |
| Hayashi et al. Briquete minério de ferro e carvão vegetal com bentonita estufado (7)             | 100        |
| <b>(1) MAXIMIANO, (2) ROSENQVIST, (3) KOTENEV, (4) SINGH, (5) SOUSA, (6) D'ABREU, (7) TANAKA</b> |            |

Fonte : Elaborado pelo Autor

### 3.2.3 - Fatores que afetam as propriedades metalúrgicas de aglomerados a frio de minério de ferro

#### 3.2.3.1 - Qualidade Física

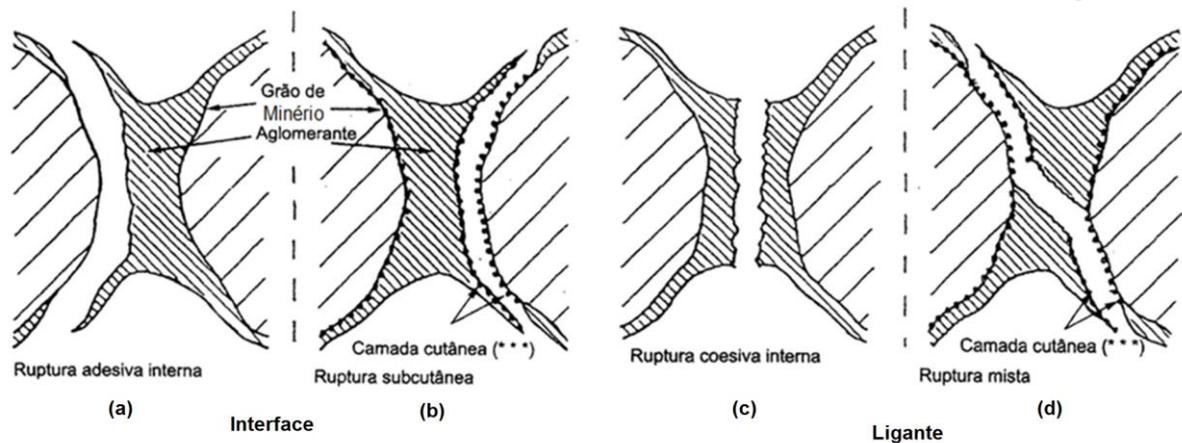
As características de resistência estão diretamente relacionadas a compactação que afeta a densidade (Pereira, 2009).

### 3.2.3.2 - Resistência dos briquetes

A resistência a compressão diametral reflete, com boa precisão os outros requisitos como friabilidade, resistência ao abrasão, esmagamento, queda e impacto (Gomes, 2009).

A figura 31 mostra os possíveis modos de fratura e degradação de aglomerados tipo briquete em fornos siderúrgicos.

**Figura 31** – Modos de fratura de aglomerados a frio tipo briquetes



Fonte: Takashi, 2008

### 3.2.3.3 - O alto-forno e a carga metálica (matérias-primas carregadas no topo)

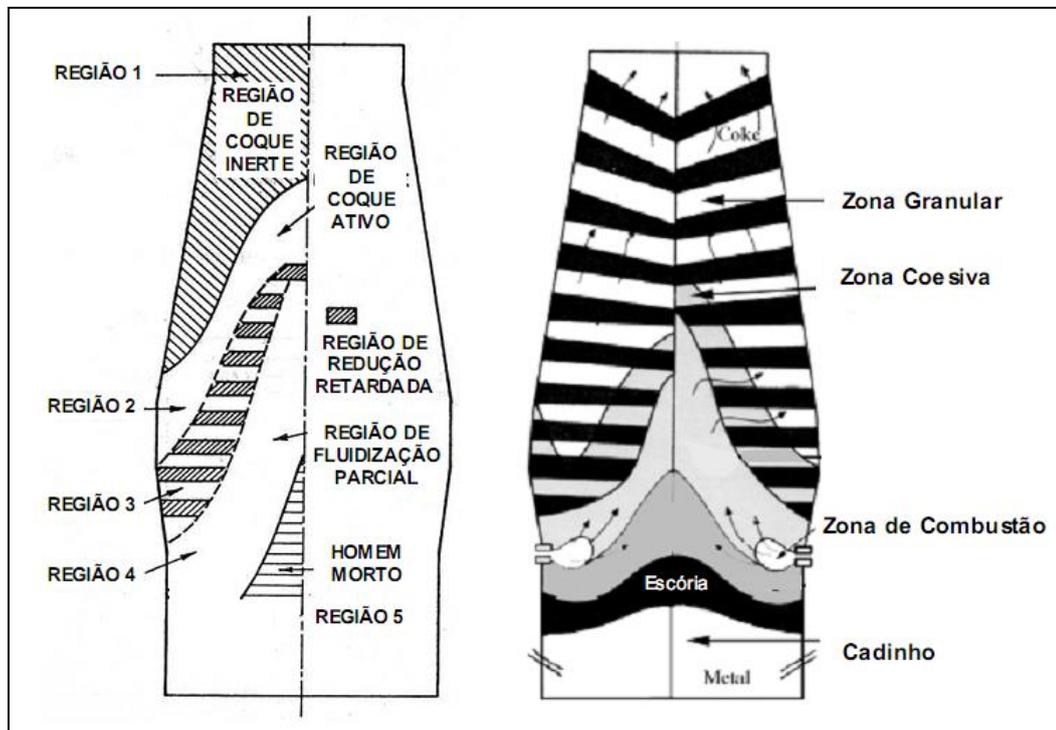
Dos equipamentos para processamento de matérias primas ferrosas o alto-forno é sem dúvida o que mais exige dos materiais nele introduzidos. (Policarpo, 2012)

Matérias primas para redução, são fontes ferríferas, carbonáceas (coque/carvão vegetal ou biomassas) e escorificantes. Uma boa carga de minério de ferro deve ter as seguintes características: **(i)** uma composição química adequada, para que no final dos processos de redução e fusão se tenha uma composição correta do ferro e da escória; **(ii)** ter uma boa permeabilidade ao fluxo de gás; **(iii)** ter boas propriedades metalúrgicas com relação à: resistência a frio, **(iv)** degradação sob-redução e propriedades de amolecimento e fusão. O coque deve possuir algumas qualidades físicas como: **(i)** o tamanho e a distribuição do tamanho devem ser de tal forma que propiciem uma boa permeabilidade ao forno; **(ii)** o teor de

cinzas e de umidade deve ser o menor possível; **(iii)** deve ter uma boa resistência à fragmentação e à abrasão (Tanaka, 2014).

O alto-forno é dividido em regiões como mostra a Figura 32. As matérias primas sofrem diversas solicitações, em cada uma destas regiões, devido ao ambiente termo-redutor reinante e as reações físico-químicas que se desenrolam no leito de fusão. Deste modo são exigidas, dos componentes da carga, propriedades específicas e adequadas às solicitações impostas (Castro, 2006).

**Figura 32** – Divisão esquemática do alto-forno em zonas de reação



Fonte: Castro (2006)

Os principais requisitos para uma boa carga metálica de um alto-forno são apresentados na Tabela 13 (Maximiano, 2011).

**Tabela 13** – Requisitos de qualidade da carga metálica nas diversas regiões do alto-forno

| ESQUEMA DA REGIÃO INTERNA    |                                                         | PROPRIEDADES REQUERIDAS                         |                  |                                   |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Zonas                        | Fenômenos                                               | Sínter                                          | Pelotas          | Granulado                         |
| Zona Granular                | Pré-aquecimento<br>Redução                              | Distribuição Granulométrica                     |                  |                                   |
|                              |                                                         | Resist. Mecânica                                | Resist. Mecânica | Resist. Mecânica e Finos aderidos |
|                              |                                                         | RDI                                             | RDI Inchamento   | RDI Crepitação                    |
|                              |                                                         | Redutibilidade                                  |                  |                                   |
| Zona de amolecimento e fusão | Amolecimento<br>Fusão<br>Redistribuição do fluxo gasoso | Propriedades em Altas Temperaturas              |                  |                                   |
| Zona de Gotejamento          | Gotejamento<br>Carbonização                             | Propriedade da Escória Primária e Escória Final |                  |                                   |
| Zona de Combustão            | Combustão                                               |                                                 |                  |                                   |
| Cadinho                      | Dessulfuração<br>Separação Metal/Escória                |                                                 |                  |                                   |

Fonte: Maximiano (2011)

A Tabela 14, resume os fatores que interferem na qualidade de um briquete, com base no apresentado na Tabela 13.

De acordo com o que é descrito na Tabela 14 os ensaios que podem ser submetidos os briquetes levando em conta, quanto às resistências e sua aplicação são: compressão, impacto, queda, densidade, manuseabilidade, abrasão, penetração de água, choque térmico, entre outros possíveis. Sendo a força de compressão em KN e resistência a compressão diametral em MPa os requisitos realmente que interessam e são exigidos. (Silva, 2013)

**Tabela 14** – Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete.

|                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                 |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Propriedades Geométricas das Partículas</b> | Tamanho de partícula<br>Distribuição granulométrica<br>Forma da partícula                                                                                                                                                                                                                                  | Estrutura<br>Densidade                                                          |
| <b>Propriedades Mecânicas das Partículas</b>   | Ângulo de repouso<br>Ângulo de atrito interno                                                                                                                                                                                                                                                              | Tensão cisalhante<br>Tensão axial                                               |
| <b>Propriedades químicas das Partículas</b>    | Contaminação superficial<br>Natureza da fase gasosa<br>Fenômeno de superfície<br>Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa                                                                                                                                                                  | Fenômeno eletrostático<br>Energia superficial                                   |
| <b>Propriedades Estruturais dos Sólidos</b>    | Deslocamentos<br>Estrutura cristalina                                                                                                                                                                                                                                                                      | Geometria molecular<br>Densidade                                                |
| <b>Propriedades Mecânicas dos Sólidos</b>      | Tensão cisalhante<br>Tensão axial<br>Resistência à compressão                                                                                                                                                                                                                                              | Limite de escoamento<br>Módulo de elasticidade<br>Dureza                        |
| <b>Propriedades Químicas dos Sólidos</b>       | Atrito<br>Composição<br>Impurezas                                                                                                                                                                                                                                                                          | Tipo de ligação química<br>Método de preparação                                 |
| <b>Condições de Processo</b>                   | Pressão, Tempo de compressão, Taxa de deformação<br>Velocidade de rolos, Temperatura, Teor de umidade<br>Aglomerantes (tipo e teor), Tempo de mistura<br>Lubrificantes, Modo e tempo de cura<br>Tipo de equipamento, Forma do briquete<br>Granulometria das matérias primas<br>Tipo de material briquetado |                                                                                 |
| <b>Características do Equipamento</b>          | Rolos                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Diâmetro<br>Tamanho e forma das cavidades dos briquetes<br>Composição dos rolos |
|                                                | Alimentador                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Efeitos da pressão<br>Pré-compressão dos materiais no alimentador               |
|                                                | Sistema hidráulico                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Rigidez dos rolos                                                               |
|                                                | Mancais                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Orientação dos rolos<br>Localização                                             |
|                                                | Estrutura                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Rigidez dos rolos                                                               |

Fonte : Ferragutti (2012)

### 3.3 - Vantagens do uso de briquetes para Introdução de Finos em Instalações Metalúrgicas

No processo siderúrgico de produção de aço, por meio das atividades de manuseio de matérias-primas são geradas elevadas quantidades de material particulado como resíduo, que é uma matéria prima que ainda não tem aplicação. (Costa, 2002) (Tabela 15)

**Tabela 15** – Principais insumos e produtos energéticos e materiais na produção de aço

| Insumos          |                  | Produtos         |                  |                |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|
| Energéticos      | Materiais        | Energéticos      | Emissões         | Efluentes      | Resíduos Sólidos |
| Carvão           | Carvão           | GAF              | SO <sub>2</sub>  | SS             | Escórias         |
| Óleo Comb.       | Minério de Ferro | GCO              | NO <sub>2</sub>  | Óleos e graxas | Pós              |
| Energia Elétrica | Ferro-ligas      | GAC              | CO               | Amônia         | Lamas            |
| Vapor            | Calcáreo         | Energia Elétrica | CO <sub>2</sub>  | Fenóis         | Carepas          |
| Gás natural      | Cal              | Vapor            | VOC              | Cianetos       | Refratários      |
| Oxigênio         | Sucata           | Alcatrão         | Particulados     | Metais         | Óleos            |
|                  | Água             |                  | PM10             |                |                  |
|                  |                  |                  | H <sub>2</sub> S |                |                  |
|                  |                  |                  | HCl/HF           |                |                  |
|                  |                  |                  | Metais           |                |                  |
|                  |                  |                  | Organoclorados   |                |                  |

GAF - Gás de Alto-forno; GCO - Gás de Coqueria; GAC - Gás de Aciaria;  
 VOCs - Compostos Orgânicos Voláteis; SS - Sólidos em Suspensão;  
 PM10 - Particulados com diâmetro menor que 10 microns  
 COD - Demanda Química de Oxigênio; DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

Fonte : Costa, 2002

Para resolver os problemas dos particulados finos, dois novos processos foram desenvolvidos com o objetivo de possibilitar a sua reutilização (Varnbüler,2007): **(i)** a introdução dos particulados finos em pedaços, em conjunto com a carga metálica; **(ii)** a insuflação dos particulados finos diretamente na zona de combustão, por meio de uma ou várias ventaneiras.

Muitos resíduos podem ser reaproveitados nos altos-fornos desde que sofram um processo de aglomeração, no entanto, existem restrições que devem ser observadas, das quais destacam-se (Lopes, 2012): **(i)** teor mínimo de ferro ou carbono; **(ii)** umidade; **(iii)** presença mínima de elementos indesejáveis; **(iv)** granulometria e forma compatíveis com o equipamento; **(v)** características tecnológicas (mecânicas e físicas) adequadas.

Os briquetes são a forma mais simples de se aproveitar os finos de minérios, fundentes e combustível. Não necessitando de todo gasto e aparato periférico e alterações de processos como na injeção pelas ventaneiras. (Lopes, 2006)

Com o uso de briquetes temos: **(i)** O consumo de combustível tende a ser menor para maiores índices de ferro metálico nos resíduos (menos reações de redução), assim como para menores quantidades de canga; **(ii)** a produtividade do forno aumenta com a redução no consumo de combustível; **(iii)** o uso de combustíveis de baixo custo e resíduos como carga, garante um baixo custo de produção do metal líquido. (Noldin, Jr., 2005)

Qualquer fonte de hidrocarboneto, descartado na forma natural (borrachas ou plásticos), ou após carvoejamento (biomassas) podem ser misturadas e aglomeradas para utilização como matéria-prima termo-redutora em fornos para substituir parcialmente o coque. (Noldin Jr., 2007)

Porém devem-se avaliar para o processo de briquetagem os seguintes parâmetros (Magossi, 2007): **(i)** Avaliação do material que será briquetado, com levantamento das propriedades após briquetagem, características físicas e químicas; **(ii)** Avaliação do processamento de briquetagem com aglomerante ou sem; processo à quente ou à frio; **(iii)** Cálculo do percentual de adição dos aglomerantes e agente redutor; **(iv)** Definição do pré-processamento para secagem, avaliação granulométrica para mistura; teor de umidade; **(v)** Condição de estocagem e armazenamento após processamento; **(vi)** Finalmente avaliação da viabilidade econômica e custo benefício do processamento.

### **3.3.1 - Vantagens dos briquetes**

Os briquetes apresentam como vantagens principais (Magossi, 2007): **(i)** regulariza a granulometria da matéria prima, facilitando a logística, por otimizar o volume transportado e armazenamento; **(ii)** permite aproveitar finos de materiais diversos em volume maior que a pelotização e sinterização; **(iii)** evita a construção de novas instalações de sinterização, pelotização e coqueificação, modernização das existentes, alterações no processo, além de diminuir o seu uso reduzindo assim a poluição causada pelas mesmas; **(iv)** a densificação dos resíduos facilita a

estocagem e amplia o raio econômico de transporte dos mesmos, viabilizando técnica e economicamente a utilização de muitos resíduos; **(v)** a briquetagem é um processo de compactação de materiais, transformando um artigo de baixo peso específico em um artigo de elevado peso específico em relação ao anterior; através desse processo, um artigo de pequeno valor, quase desprezível, pode ser convertido em um artigo valioso; **(vi)** o processo de briquetagem é uma forma indicada para aproveitar resíduos em relação a sua reutilização; **(vii)** pode ter suas características mecânicas e forma adequadas ao uso; **(viii)** possui vários tipos de máquinas para produção; **(ix)** o briquete proporciona praticidade em seu manuseio e limpeza; **(x)** os briquetes de material combustível tem elevado poder calorífico; **(xi)** apresenta uma relação de custo/benefício muito baixa; **(xii)** tem formas e dimensões apropriadas; **(xiii)** propriedades uniformes; **(xiv)** facilidade de fornecimento regular; **(xv)** minimiza problemas ambientais que podem ser gerados no descarte ou armazenamento dos finos; **(xvi)** são produzidos em tamanhos padrões, **(xvii)** ocupa espaço de armazenagem reduzido; **(xviii)** produto higiênico sem os inconvenientes da lenha; **(xix)** produto 100% reciclado e ecologicamente correto, pois diminui o desmatamento; **(xx)** em razão da sua regularidade térmica mantém o calor homogêneo, maior temperatura de chama, **(xxi)** menor índice de poluição pois é um combustível renovável, permite o aproveitamento do resíduo das indústrias; **(xxii)** reduz custos gerais de processo e pode ser gerador de receita; **(xxiii)** o briquete é um produto 100% reciclado, **(xxiv)** reduz a mão de obra no manuseio do produto, **(xxv)** cada metro cúbico abriga 1300 kg de briquete, em 10m<sup>2</sup> aloja-se 15 toneladas de briquetes; **(xxvi)** excelente relação custo x benefício, quando comparado a substituição parcial por sucata de aço; **(xxvii)** opção adicional de matéria-prima: substituição parcial das matérias-prima padrão (sucata de ferro, ferro gusa, sinter, etc.); **(xxviii)** melhora a preparação dos cestos de sucatas (por ter alta densidade, o briquete é um agente facilitador no processo de montagem de cargas frias); **(xxix)** tem facilidade de armazenamento e transporte; **(xxx)** produto com composição química pré-definida conhecida e garantida em função de se conhecer a composição dos materiais adicionais para mistura e confecção dos briquetes; **(xxxi)** alta densidade de resíduos prensados, com elevado poder calorífico; **(xxxii)** permite o controle do descarte de resíduos; **(xxxiii)** formato geométrico que facilita transporte e manuseio; **(xxxiv)** permite a possibilidade de adequação da composição química

para substituição parcial ou total da carga de ferro, combustível ou fundente; **(xxxv)** a densidade, que é definida como a relação entre a sua massa e o seu volume pode ser controlada, quanto maior a densidade maior incorporação ao banho no forno; **(xxxvi)** permite o cálculo para atingir a composição química adequada do briquete, que implicará a incorporação de alguns teores dos elementos específicos para alcançar a composição.

### **3.4 – Visão de Mercado : Justificativas para o desenvolvimento dos briquetes**

A usina integrada baseada em altos-fornos apresenta: altos custos de investimento; linhas de produção complexas e produtividade média em termos de capital, mão-de-obra e consumo de matéria-prima. Com as alterações que vem ocorrendo no mercado com maior intensidade em direção ao novo milênio, ocorre uma nova “onda” no desenvolvimento de novas tecnologias de produção de ferro primário, alterando os processos atuais e futuros de produção de aço, visando atender a lista de exigências da siderurgia moderna que pede baixos níveis de emissões danosas ao ecossistema local; flexibilização de escala de operação, de uso de matérias-primas e de produto; uso de combustíveis sólidos alternativos; dispensa de unidades de coqueria e sinterização; utilizar carvões não-coqueificáveis ou de qualidade inferior; maior eficácia para a reciclagem dos resíduos gerados pela unidade e por terceiros; permitir uma adequada integração processo-produto; metalurgia de finos (viabilizar o uso de finos na forma de briquetes e/ou pelotas), baixos custos fixos; operar com menor custo por tonelada; aliar alta produtividade com flexibilidade operacional para atender às variações de demanda; maior compatibilidade ambiental (apresentar condições de baixo impacto ao meio ambiente); baixo custo operacional, mesmo para escalas de produção mínimas; baixo custo de instalação, ampliação ou reforma; boa adequação às instalações e procedimentos existentes; uso otimizado da área disponível; baixos níveis de emissões gasosas; utilizar uma grande variedade de carvões e chegar a um consumo energético comparável ao de um alto-forno moderno; utilizar, se possível, uma ampla variedade de minérios, com um mínimo de preparação; produzir ferro primário com qualidade e consistência para convertidores a oxigênio ou FEA (Forno Elétrico a Arco); ter alta eficiência energética; utilização de periféricos

clássicos; possibilidade de uso de instalações existentes (retrofit); eliminação ou adaptação de etapas da cadeia produtiva atual.( Noldin Jr., 2008)

Grande parte dos minerais presentes nas rochas tem grande utilidade no cotidiano de milhões de pessoas em todo o mundo. Deles são extraídas substâncias metálicas (como o ferro) e não-metálicas, aplicadas pelo ser humano em diversas atividades indústrias. (Mann, 2001)

Existe uma crescente influência de minerais sobre toda e qualquer atividade de desenvolvimento de um país. Com o aumento das populações, cada dia se necessita de maior quantidade de matéria-prima para atender a crescentes necessidades do ser humano. (Mann, 2001)

Baseados nestes fatos é fácil concluir que brevemente o ser humano enfrentará uma série de crise de matérias-primas, alimentação, água, energia e outros. (Mann, 2001)

Custos operacionais da produção, questões ecológicas, exigências legais relacionadas com preservação/conservação do meio ambiente e a saúde do homem são fatores que justificam a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para restringir ao máximo o uso de recursos naturais e geração de resíduos. (Mann,2001)

Como vivemos numa “bolha de vida” e tudo o que se faz aqui reflete obrigatoriamente em toda parte, a sucessão de ocorrências catastróficas ligadas ao clima e ao meio ambiente, constantemente atacados pelo nosso modo de vida; acabaram forçando a humanidade a repensar sua forma de se relacionar com o planeta. Isso ajudou muito a criar uma consciência planetária de que algo deve mudar.(Kuhn, 2011)

Ao contrário do que se pensa comumente, os impactos ambientais dos produtos industriais não começam onde são mais visíveis, ou seja, na fase do consumo quando eles poluem o ar, contaminam águas e solos onde são descartados ao fim de sua vida útil. A origem desses problemas está na verdade na fase do projeto, ou seja, na concepção, no desenvolvimento e na seleção dos materiais. (Medina, 2006)

Um processo produtivo é o resultado de aplicação de energia, mão de obra e insumos sobre uma matéria prima, o que gera produtos, subprodutos e emissões que são um risco ao meio ambiente. .(Kuhn, 2011)

Risco é um termo que se refere à probabilidade de ocorrência de um efeito adverso a um organismo, sistema ou população, causado por circunstâncias específicas e devido à exposição a um agente. Os efeitos adversos podem ser de ordem econômica, ecológica, ou ainda incidir sobre saúde e segurança humana. (Silva, 2006)

A engenhosidade humana trouxe ao homem, até este momento sem precedentes na sua história, uma imensa capacidade de mudar o funcionamento do planeta, com conhecimento vasto para atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades(Mann, 2001)

Diante do grande consumo de recursos naturais, o que acarreta uma previsível escassez de água potável, a perda da biodiversidade e o aumento da poluição, sobretudo no que diz respeito à mudança climática global, um número cada vez maior de empresas vem incorporando em suas estratégias o conceito da sustentabilidade. As empresas são alvo de novas expectativas quanto as suas responsabilidades para com a sociedade como agentes que dispõem de recursos financeiros, organizacionais e tecnológicos para uma atuação mais ágil, decisiva e direta na solução dos problemas ambientais e sociais.(Valentina, 2006)

O futuro depende de nossa capacidade de inovar e de transformar idéias em produtos. Assim a substituição de matérias-primas metálicas naturais por materiais alternativos (reciclados) é um bom atalho para alcançar a sustentabilidade ambiental e financeira. (Mann, 2001)

Na siderurgia convencional a idéia geral era de que os avanços já não eram mais revolucionários, mas sim, evolucionários. Nesse caso, os processos são altamente consagrados e maduros. Conseqüentemente, tem-se uma idéia errônea que há pouco espaço para novos desenvolvimentos. (Mann, 2001)

Na indústria metalúrgica e mineração, identifica-se a aplicação de novas tecnologias quando um ou mais dos seguintes elementos estão presentes: uma alteração significativa na rota de processo, diferenciada da prática estabelecida no restante daquele segmento da indústria; produção de um novo produto ou extensão de uma linha de produtos; e aplicação de tecnologia transferida de indústrias que processam outras commodities com sucesso. O conceito de inovação tecnológica envolve a aplicação bem sucedida de novas idéias. Esta aplicação não requer, necessariamente, sua origem em uma invenção. A inovação pode se constituir, por exemplo, na combinação de tecnologias existentes para criar novas aplicações.(Cardoso, 2013)

A inovação de produto consiste em oferecer um produto, ou um serviço, que apresenta pelo menos uma novidade em relação às ofertas existentes e que seja percebido como tal pelo mercado visado. A inovação de método/processo consiste numa transformação dos processos industriais e métodos levados a efeito para conceber, realizar e distribuir os produtos e serviços. (Pereira, 2005)

Aliás, segundo De Paula (2002), a estratégia tecnológica da siderurgia brasileira deveria privilegiar a difusão de processos tecnológicos já provados e inovações incrementais, uma vez que: a) a siderurgia é uma indústria madura, sendo as rupturas tecnológicas pouco freqüentes; b) a tecnologia está intensamente incorporada nos equipamentos, e os principais fabricantes de equipamentos metalúrgicos (que detêm a tecnologia do processo) são europeus e japoneses; c) no país, não existe background técnico suficiente, seja no setor, seja nos seus fornecedores de tecnologia (fabricante de equipamentos, empresas de engenharia, universidades e institutos de pesquisa), para fazer frente aos elevados riscos envolvidos no desenvolvimento de novos processos produtivos; d) fatores externos à empresa, como a instabilidade macroeconômica e o alto custo do dinheiro, tendem a induzir um comportamento empresarial mais avesso ao risco; e) a própria instabilidade patrimonial da siderurgia brasileira foi e continua sendo um complicador adicional para estimular atividades cujos resultados são de longo prazo.

De acordo com Furtado (2000), a siderurgia é um setor *demand pull*, em que as necessidades dos consumidores direcionam as ações tecnológicas,

diferentemente dos setores *technology push*, que se caracterizam por rápidas e grandes inovações tecnológicas. Além disso, numa indústria que se caracteriza por um aparato produtivo tão vasto e complexo como costuma ser cada usina siderúrgica, há, naturalmente, amplo espaço para o constante desenvolvimento da tecnologia de processo.

As inovações observadas no mercado siderúrgico vão desde uma simples variação do produto existente ao totalmente novo, uma inovação de fato. Categorias de novos produtos, em termos de novidades para a empresa e para o mercado, vão de um produto totalmente novo a acréscimos e/ou melhorias em linhas já existentes, produtos antigos para a empresa lançados em novos mercados e ainda novos produtos com desempenho semelhante a custo mais baixo. (Turani, 2006)

D'Abreu (2009) define como tecnologia e inovação na siderurgia, a concepção sustentável de um novo produto ou processo, bem como a agregação de novas funcionalidades ou características ao produto ou processo já existentes, que impliquem em efetivos ganhos de qualidade e produtividade, resultando numa maior competitividade do setor, e que as forças motrizes do desenvolvimento tecnológico, são: custo de capital (alto “CAPEX”), demandas de mercado (exigências crescentes de qualidade e desempenho do aço), custos operacionais (diminuição de “OPEX”), restrições ambientais (exigências crescentes; eficiência de emissões), carência de matérias primas (reciclagem), excesso de resíduos (transformação em co-produto, novas utilidades), disponibilidade de fontes energéticas.

A utilização do briquete é justificada no presente trabalho levando em conta as considerações propostas em Baptista (2013), onde cita em sua pesquisa, como oportunidades de mercado os seguintes itens: **(i)** desempenho do setor de matéria-prima (custo, qualidade, quantidade); **(ii)** reduzir os impactos da produção do aço; **(iii)** queda na qualidade, degradação química e física das reservas de minério de

ferro gerando maior volume de finos e a necessidade de concentração (briquetagem); **(iv)** as reservas de minério de ferro de qualidade estão previstas para serem reduzidas drasticamente em 20 anos (haverá escassez de minério granulado no mercado); **(v)** aumento do uso do aço e conseqüentemente de sua produção levando a elevação do consumo da quantidade de minério para produção de bens de consumo, gerando maior quantidade de finos; **(vi)** mais uma opção de matéria prima para os novos processos de produção de ferro primário; **(vii)** não utilizar o recurso natural tipo bentonita (aglomerante), evitando os impactos ambientais de sua industrialização, **(viii)** custo sobre a matéria prima e alguns efeitos negativos significativos sobre os aglomerados como inchamento e degradação, **(ix)** alterações no Alto-Forno (uso de briquetes, uso duplo de coque e carvão vegetal no mesmo AF; **(x)** bi-combustível (tecnologia flex-fuel) e diminuição do uso de coque); **(xi)** uso de aglomerados autor-redutores; **(xii)** nova opção de fonte metálica para fornos elétricos. **(xiii)** aumento do uso do Forno Elétrico a Arco; forte competição entre a rota integrada e semi-integrada de fabricação de aço (aumento do uso de aciaria a oxigênio e elétrica); **(xiv)** aumento do uso como carga principal para obtenção de componentes fundidos; fonte de Biomassa Termoredutora (Biorredutor); **(xv)** reciclagem de finos, eliminar barragens e aterros; **(xvi)** uso de escórias de aciaria como aglomerantes, obter aglomerados de cura natural ao ar.

As matérias primas utilizadas na siderurgia passaram a ser um grande fator de competitividade, como visto na Figura 33 (a) (b) (c), devido a limitação das reservas minerais (Figura 34) e a modificações nos padrões da sociedade em todo o mundo (Figura 35) elevando o consumo de manufaturados, tendo como conseqüência aumento da produção de aço. Outro ponto de destaque, que foi citado é que com a baixa qualidade do minério aumenta-se a sua quantidade para a produção da tonelada de aço (Figura 36), gerando também mais descartes, resíduos e rejeitos. Em vista disto ocorreu a necessidade de desenvolvimento de novos processos de redução como visto na Figura 37 e 38. (Mourão, 2008)

**Figura 33 - Elementos de competitividade na siderurgia**

**COMPETITIVIDADE DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**  
Modelo Conceitual



(a)

**FATORES CHAVE DA COMPETITIVIDADE - SIDERURGIA BRASILEIRA -**

|                                  | SITUAÇÃO ATUAL | TENDÊNCIA |
|----------------------------------|----------------|-----------|
| ➔ Fatores Intrínsecos            |                |           |
| Minérios                         | *****          | →         |
| Redutores                        |                |           |
| carvão                           | ***            | →         |
| gás natural                      | -              | ?         |
| Energia elétrica                 | ****           |           |
| Escala da produção               | ****           | ↗         |
| ➔ Fatores Estruturais            |                |           |
| Tamanho do mercado interno       | ***            | ↗         |
| Acesso a outros mercados         | ***            | ↗         |
| Infraestrutura/logística         | ***            | ↗         |
| ➔ Fatores Econômico Financeiros  |                |           |
| Custo de Capital p/ investimento | *              | ↗         |
| Custo de Capital de Giro         | *              | ↗         |
| Carga Tributária                 | *              | ↗         |
| ➔ Outros Fatores Relevantes      |                |           |
| Tecnologia                       | ****           | ↗         |
| Recursos Humanos                 | ****           | ↗         |
| Estabilidade Econômica           | ***            | ↗         |

\*\*\*\*\* Benchmark

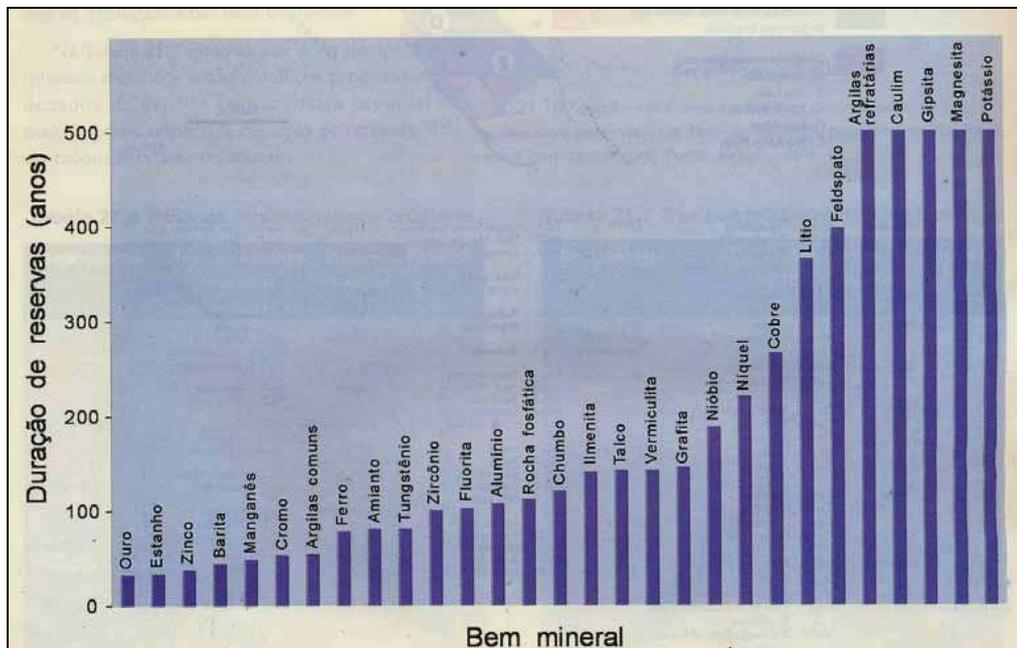
(b)



(C)

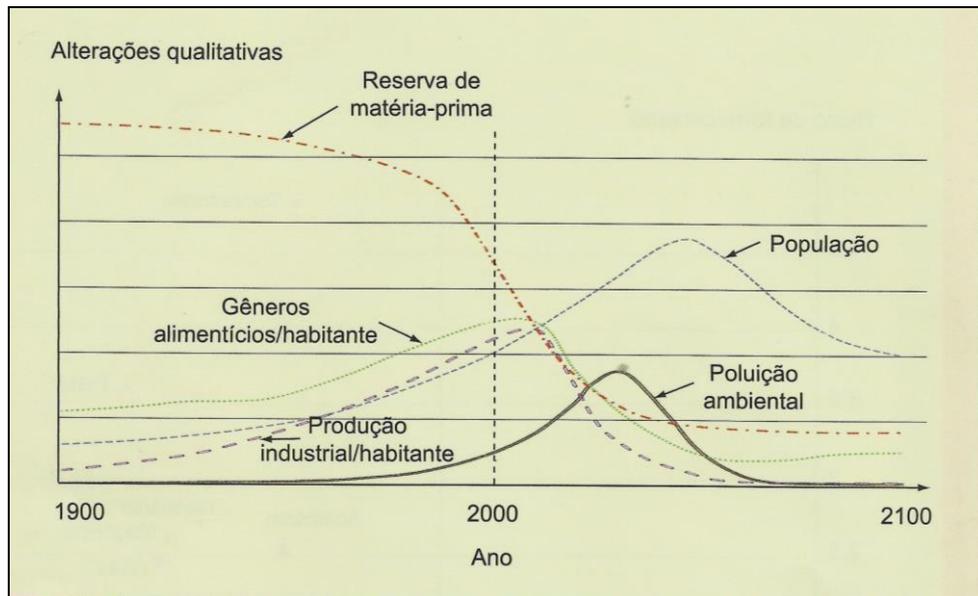
Fonte: Bülher, 2005

Figura 34 – Demonstrativo do estoque de minerais



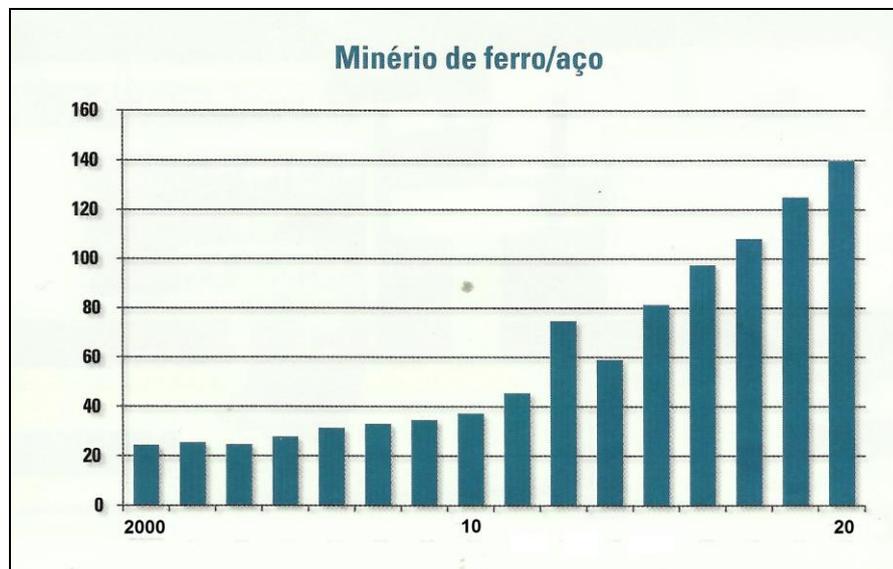
Fonte: Baptista, 2013

**Figura 35** – Evolução do padrão (modelo mundial) e consumo de matéria-prima



Fonte: Baptista, 2013

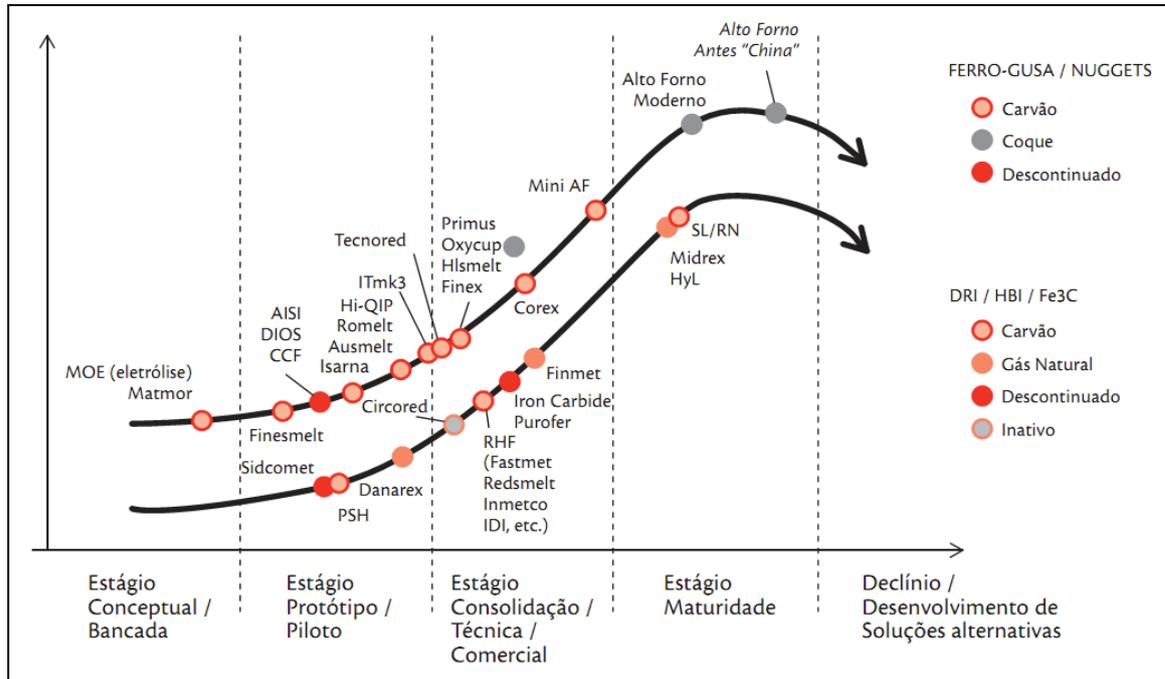
**Figura 36** – Aumento do uso de minério para produção da tonelada de aço



Fonte: Baptista, 2011

Os novos processos de produção de ferro de ferro primário que absorvem os descartes finos na forma de aglomerados são mostrados na Figura 37

**Figura 37** – Novas Tecnologias de produção de ferro primário



Fonte: Melo (2009)

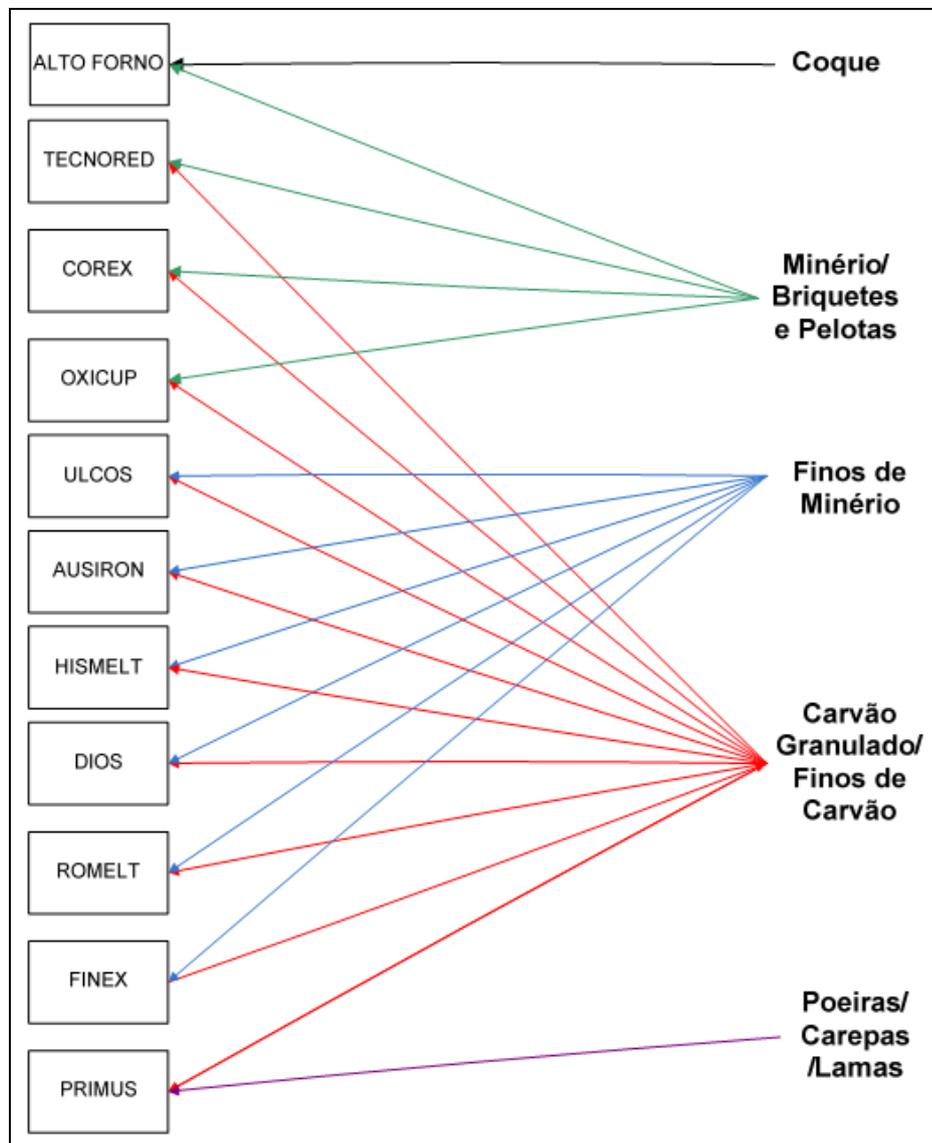
A Figura 38 ilustra e resume a classificação quanto à natureza das matérias primas carregadas nos processos alternativos de produção de ferro gusa.

Ajustar o processo de fabricação do aço às novas exigências do consumo, num cenário macroeconômico onde as margens de lucro são reduzidas pelo custo das matérias-primas é questão de sobrevivência. (Poppinga, 2015)

No momento em que a flexibilização do consumo de matérias-primas tornou-se uma variável vital na equação de custos das siderúrgicas. Materiais menos nobre que pressione menos os custos operacionais, porém, sem impactar negativamente na estabilidade operacional, são bem vindos. (Poppinga, 2015)

Qualidade dos insumos garante as especificações técnicas de qualidade desejadas do gusa com um menor custo. A qualidade do gusa garante especificações do aço. (Poppinga, 2015)

**Figura 38** – Classificação dos processos alternativos à luz das matérias primas (carbonosas e ferrosas)



Fonte: Passos (2009)

A briquetagem de minérios de ferro vem ganhando cada vez mais importância, em função de alguns fatores principais: **(i)** a degradação dos granulados vem estimulando o incremento do uso das aglomerados diferentes do sinter na carga dos altos-fornos; **(ii)** as restrições ambientais e de custo à expansão da sinterização e pelotização, já em vigor nos países desenvolvidos, também vêm induzindo ao maior consumo de briquetes; **(iii)** a crescente geração de finos vem

consolidando a briquetagem como a tecnologia mais adequada para o uso deste minério superfino; **(iv)** a necessidade de menor exploração de minério aglomerante (bentonita) e substituição do mesmo; **(v)** eliminação das barragens e áreas para descarte de rejeitos; **(vi)** a total utilização de reciclados; **(vii)** a utilização da umidade natural dos minérios para redução do consumo de água; **(viii)** modernização e maior emprego de fornos elétricos a arco; **(ix)** tornar a aglomeração um processo mais amigável e ecológico executando a cura natural do mesmo eliminando o processo de queima; **(x)** evitar os fenômenos de degradação e envelhecimento hoje problemáticos na área de pelletização; **(xi)** a maior difusão das novas tecnologias de produção de ferro primário vem ampliando a demanda de briquetes para esta aplicação específica (trata-se de tecnologias de produção de ferro a base de matérias-primas menos nobres); **(xii)** a aglomeração a frio (briquetagem) como caminho para a mineração e siderurgia suprir a queda de qualidade e demanda de materiais naturais. (Madas, 2015)

O ponto mais importante no desenvolvimento da indústria siderúrgica é o mercado e a evolução do consumo de produtos siderúrgicos. Os pontos que merecem destaque: as matérias primas, novos processos de fabricação de ferro bruto, os tipos de produtos, os tipos de aços. O que tem servido como força motriz para o desenvolvimento de tecnologias de redução que tenham baixo custo de investimento e operação e que permitam a utilização eficiente de matérias-primas não convencionais. Caso tenham êxito, estas tecnologias tem o potencial de: aumentar a oferta de matérias primas no mercado (redução de custo e maior disponibilidade local); reduzir o custo operacional de produção de ferro primário; e aumentar a utilização e longevidade das reservas atuais de minério e carvão; reduzir ou eliminar os custos ambientais com a redução de espaços físicos para aterros de descartes; evitar desastres ambientais advindos da criação de barragens (Spiri, 2012)

No tocante as matérias primas, os objetivos da siderurgia envolvem: **(i)** minimizar o uso de coque, sinter e pelotas; **(ii)** reaproveitamento total dos insumos; **(iii)** uso do briquete; **(iv)** aglomeração sem água (utilizando a umidade natural do minério); **(v)** encontrar um substituto para a bentonita; **(vi)** não ter que queimar os aglomerados para obter as características desejadas. (Spiri, 2012)

No que se refere ao uso do briquete em alto-forno, Souza (2005), cita que para uma substituição de sinter de aproximadamente 40% obtém-se um aumento em torno de 20 à 40% na produtividade do mesmo e diminuição de cerca de 25% no consumo de coque.

### **3.5 - Como é utilizado o briquete nas instalações metalúrgicas de produção de ferro e aço**

Os briquetes são utilizados nos fornos de redução e conversão na forma de aglomerados auto-redutores. A tecnologia de auto-redução se baseia no uso de aglomerados nos quais o minério de ferro (ou resíduos contendo óxidos de ferro) é misturado conjuntamente com material carbonáceo (carvão vegetal, moinha de coque, carvão fóssil, biomassa, etc) que terá a função de redutor dos óxidos. Apresenta vantagens cinéticas significativas sobre a redução convencional por gases. Aglomerados não podem ser queimados para fornecer resistência mecânica, pois acarretaria na combustão do material carbonáceo. Ou o processo não exige mecanicamente dos aglomerados, ou este deve ter em sua composição um aglomerante (cimento Portland, cal, escória de alto-forno, melão) que forneça resistência a frio (Costa, 2001).

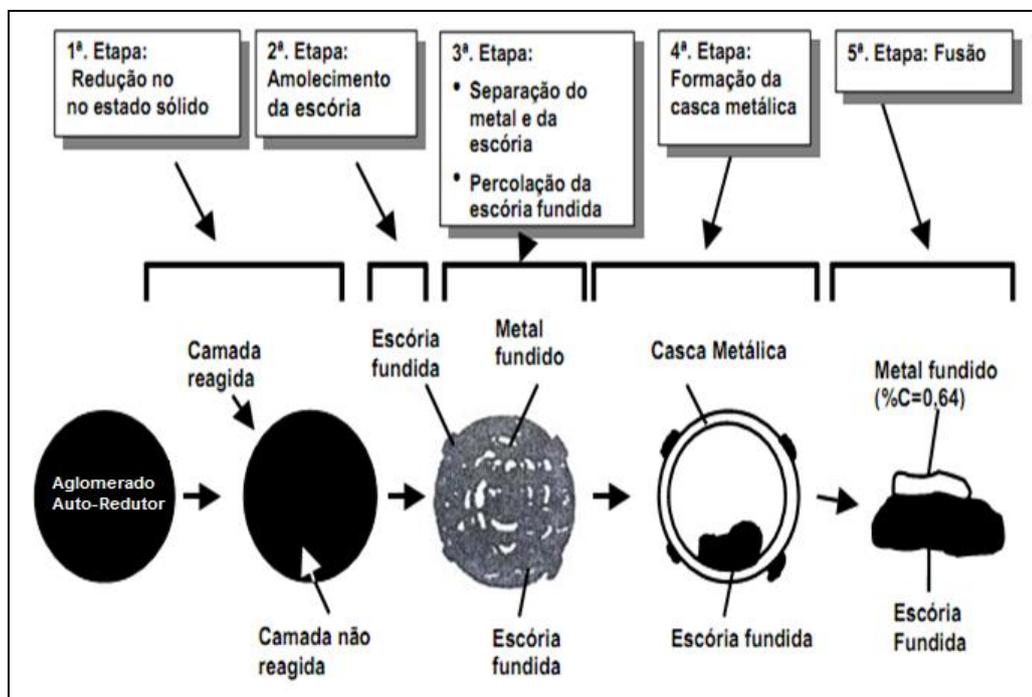
O conceito de autorredução se aplica ao processamento metalúrgico de óxidos metálicos onde um agente de redução sólido, geralmente material com teores razoáveis de carbono fixo, está intimamente misturado com os óxidos metálicos a serem reduzidos. Estas substâncias formam um conjunto coeso, que ao ser submetido a um gradiente térmico conveniente numa atmosfera controlada, conduz à redução do metal. Além dos óxidos metálicos e do agente redutor, a esta mistura também podem ser adicionadas outras substâncias, tais como escorificantes. (D'Abreu, 2001)

Em vista disso, pode-se considerar aglomerados autorredutores como um caso particular de aglomerados autorreagentes.

Pelo exposto, verificam-se algumas diferenças entre os processos tradicionais e a utilização de aglomerados autorredutores, quais sejam: flexibilização no uso de matérias-primas; aproveitamento das frações de baixa granulometria tanto

de óxidos de ferro como de redutores; os óxidos de ferro e o redutor encontram-se próximos, num mesmo agregado compacto, com grande área superficial disponível para as reações necessárias à redução; os gases redutores são gerados no interior do agregado, praticamente não existindo a etapa de difusão destes gases do ambiente externo para o interior, como nos processos tradicionais. Além disso, esta geração de gases implica numa pressão parcial de monóxido de carbono mais elevada pela inexistência de gases inertes como o nitrogênio. Pelas suas características, os aglomerados autorredutores tem a possibilidade de desenvolver uma cinética mais rápida, comparando aos processos tradicionais. (D'Abreu, 2001) O mecanismo deste processo é descrito na Figura 39.

**Figura 39** – Mecanismo proposto para a auto-redução de aglomerados.



Fonte: Reis (2008)

As etapas em que se divide a auto-redução são mostradas esquematicamente na Figura 40.

A redução de compósitos auto-redutores envolvem dois tipos de reações: reação direta sólido-sólido entre os óxidos de ferro e o carbono e reações gás-sólido.

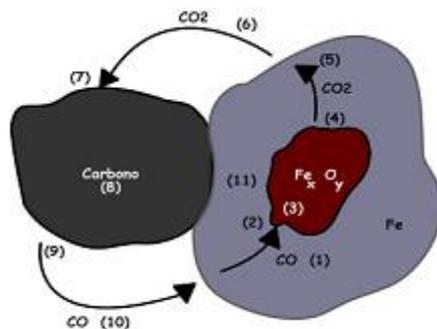
**Figura 40 - Etapas da auto-redução**

Figura 11. Etapas da autorredução  
 Fonte: adaptado D'Abreu et al.(2008)

- (1) - Difusão de CO através dos poros da camada de ferro metálico.
- (2) - Adsorção de CO pelo óxido  $Fe_xO_y$ .
- (3) - Reação de redução dos óxidos  $Fe_xO_y$ .
- (4) - Dessorção de  $CO_2$  da superfície do óxido.
- (5) - Difusão do  $CO_2$  através da camada porosa de Fe metálico.
- (6) - Transporte do  $CO_2$  nos poros da mistura.
- (7) - Adsorção de  $CO_2$  pelo carbono.
- (8) - Reação de Boudouard.
- (9) - Dessorção de CO da superfície do carbono.
- (10) - Transporte de CO nos poros da mistura.
- (11) - Redução direta sólido-sólido.

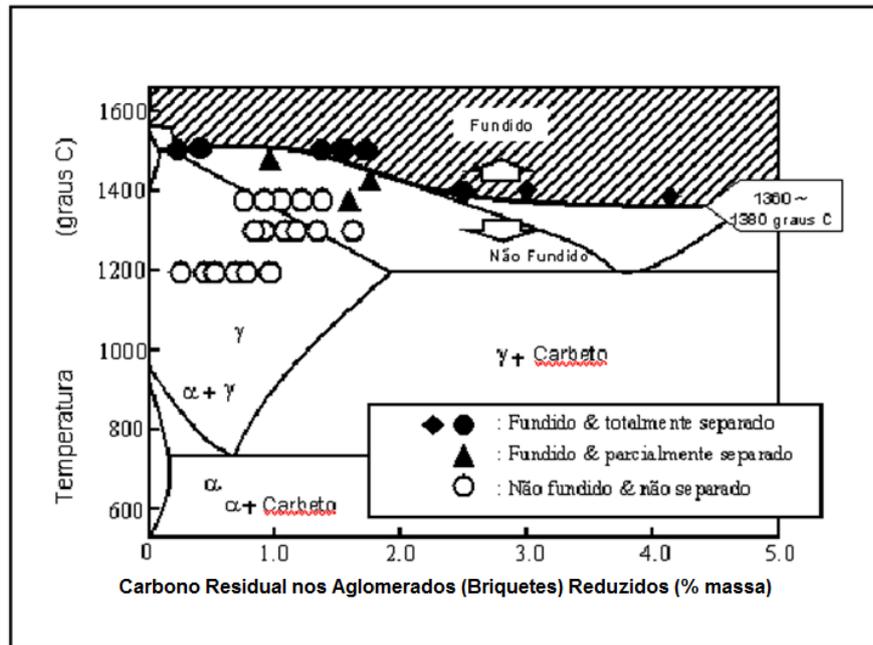
Fonte: Reis (2008)

A granulometria da mistura a ser briquetada é importante nesse processo, pois o aumento da área superficial das partículas eleva a área de contato entre estas, favorecendo a aglomeração, reações de gaseificação do carbono e redução dos óxidos de ferro. (Reis, 2008)

Os principais fatores ou variáveis que influenciam a auto-redução, segundo a maioria dos pesquisadores, são: Temperatura de trabalho; Composição dos aglomerados; Estequiometria (relação carbono/óxido); Presença de catalisadores ou inibidores; Propriedades das matérias primas (reatividade, condutividade térmica, etc.); Propriedades relativas à mistura (granulometria, porosidade e tortuosidade dos materiais, morfologia das partículas, homogeneidade da mistura, etc.); Presença de impurezas e ganga; Área de contato entre metal e óxidos não-reduzidos; Difusão iônica e gasosa através das camadas porosas; Propriedades de leito (permeabilidade, porosidade, etc.); Propriedades do gás. (Reis, 2008)

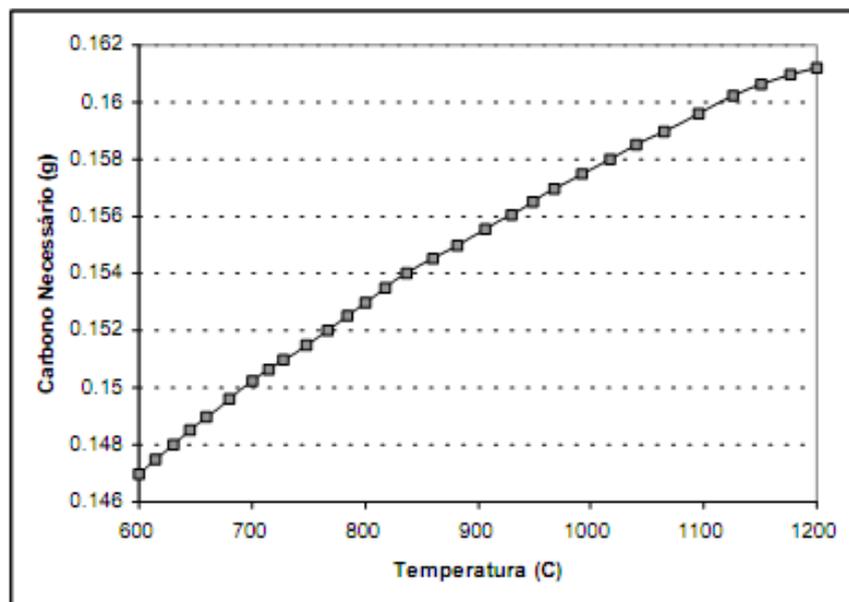
Qualquer interação (reação) entre o elemento ferro e o carbono é regida pelo sistema Fe-C na forma de cementita ou carboneto e grafita, tanto no estado sólido como fundido. O fenômeno de fusão dos aglomerados auto-redutores embasado no diagrama ferro-carbono é mostrado na Figura 41. A figura 42 mostra a relação carbono e temperatura de trabalho. (Reis, 2008)

**Figura 41** - Curva limite da fusão de aglomerados auto-redutores e sua separação da escória no diagrama Fe-C



Fonte: Reis,2008

**Figura 42** - Carbono necessário à redução em função da temperatura



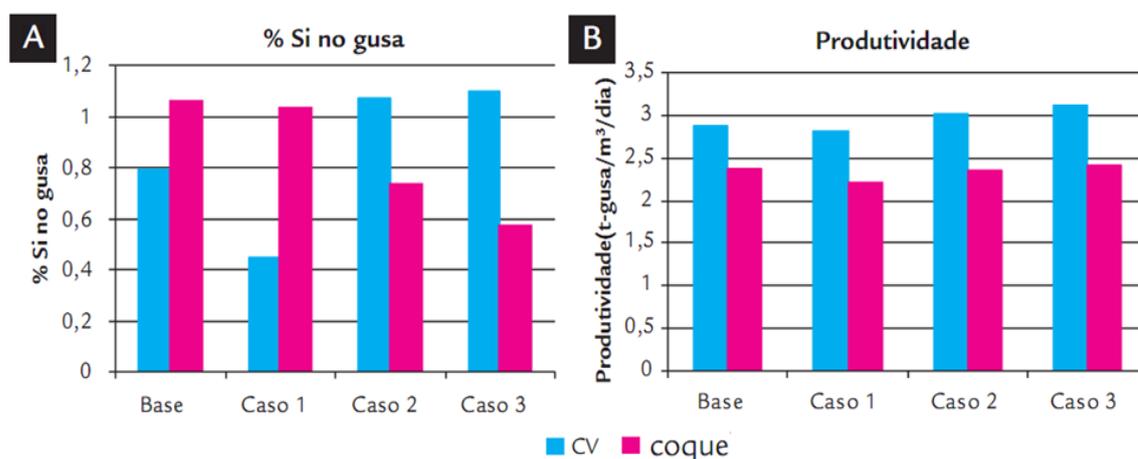
Fonte: Reis,2008

Matos e Castro (2012) em seu trabalho mostram o desempenho do alto-forno a carvão vegetal ou a coque) com o uso do briquete autorredutor, nas seguintes proporções : Caso 1 = 15% de briquetes + 75% de sínter. + 10% Pelotas; Caso 2 =

25% de briquetes + 65% de sínter. + 10% Pelotas; Caso 3 = 35% de briquetes + 55% de sínter. + 10% Pelotas. Os resultados apresentados a seguir referem-se à análise qualitativa da influência sobre o teor de silício no gusa, produtividade, consumo de redutor, volume de escória e consumo de sínter do reator para os diferentes redutores.

Os resultados apontam, em ambos os casos, um aumento de produtividade e uma redução no consumo de redutor e matéria-prima elaborada, sem causar grandes alterações nos indicadores de qualidade do gusa e de controle operacional (Figura 43).

**Figura 43** – Parâmetros operacionais do processo



Fonte: Matos e Castro,2012

(CV – carvão vegetal), A - % Si no gusa , B - Produtividade

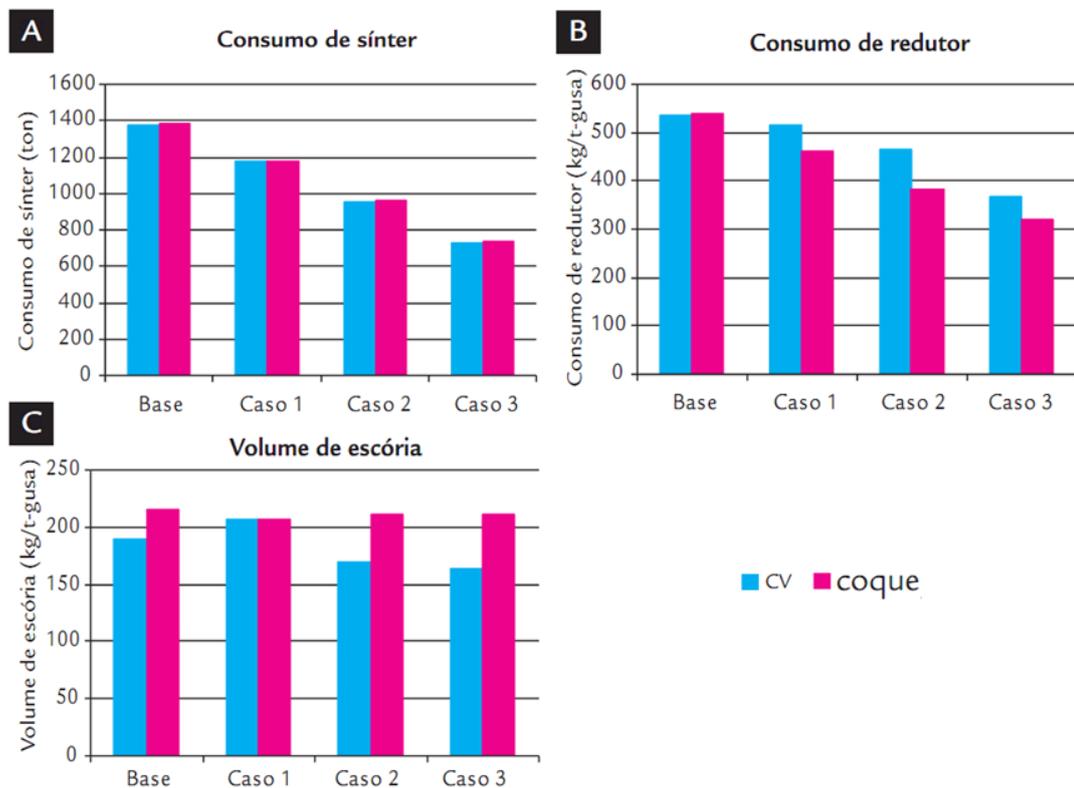
Nota-se que, em ambos os combustíveis, o aumento no uso de briquete autorredutor favorece um menor consumo de sínter e redutor, mantendo o volume de escória dentro dos limites usuais de operação. No caso da operação com coque, o volume de escória foi maior, devido ao ajuste feito para se obter basicidade intermediária, o que garantiria flexibilidade operacional sem desgaste excessivo de refratários. (Matos e Castro,2012)

É interessante notar que maior redução no consumo de redutor pode ser verificado no uso do coque. Esse fato deve ser justificado, devido ao abaixamento da temperatura da zona de reserva térmica, devido ao carregamento de aglomerado autorredutor. A redução do consumo específico de sínter foi devido à sua

substituição por aglomerado autoreductor na carga na razão de 1.2 kg de aglomerado/ kg de sínter. (Matos e Castro,2012)

As condições internas do processo foram afetadas de forma positiva em ambos os cenários (Figura 44), indicando que tais operações seriam possíveis nesses reatores. Os resultados dessa pesquisa indicam que os fornos siderúrgicos de podem desfrutar de grande flexibilidade do ponto de vista de agentes redutores e carga metálica preparada de forma otimizada, sobretudo se considerarmos que esses reatores demandam cada vez maior controle de distribuição granulométrica do coque. (Matos e Castro,2012)

**Figura 44** - Principais resultados no processo de redução (balanço material)



(CV – carvão vegetal)

Fonte: Matos e Castro,2012

A combinação da utilização de carga autorredutora permite a substituição de combustível sólido com baixos tempos de residência na zona granular, o que possibilita incrementos consideráveis na marcha do forno com menor degradação da mesma. Resultados obtidos, apontaram para uma maior produtividade quando utilizados o carvão vegetal como combustível e percentuais de briquetes da ordem

de 45%. O consumo de coque granulado poderia ser reduzido para até 221kg/ton gusa, utilizando-se também de small coque como combustível. (Matos e Castro,2012)

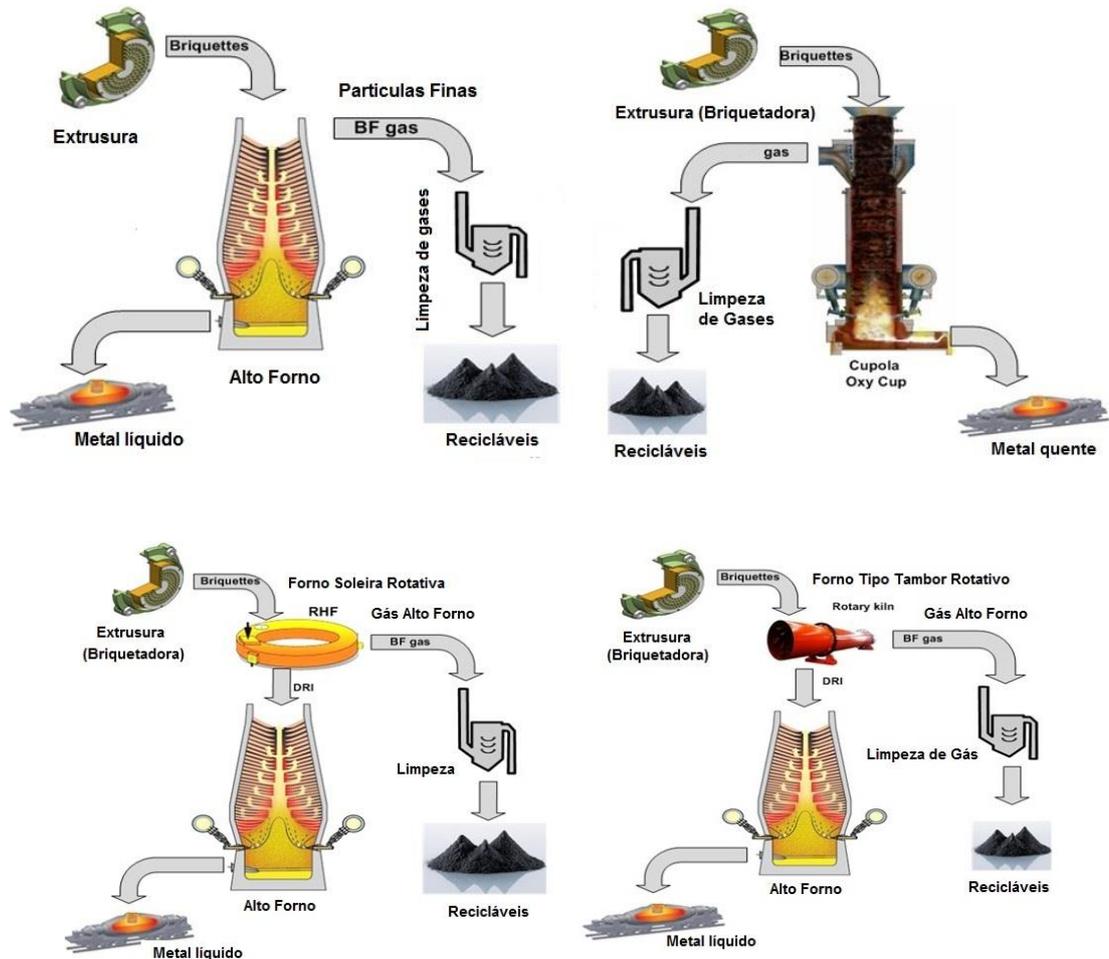
O carregamento de aglomerado autorredutor em substituição a parte do sinter, além de reduzir o consumo de combustível, possibilita reciclar resíduos gerados no próprio processo, que têm um teor de ferro considerável e pouca ou nenhuma alternativa de aproveitamento. (Matos e Castro,2012)

### **3.6 - Equipamentos Siderúrgicos que podem Utilizar Briquetes em sua Carga**

Os briquetes são utilizados em equipamentos de redução e fusão (altos-fornos e fornos cubilot e similares); de refino e fundição (conversores, fornos elétricos, fornos rotativos, forno panela) e de transferência (carro-torpedo e painéis de vazamento). São empregados diretamente ou pré-processados. A figura 45 ilustra esta utilização. (Kurunov, 2011)

Segundo Lemos (2015), a utilização de briquetes auto-redutores em altos-fornos têm várias vantagens, a saber: **(i)** a redução do minério de ferro é iniciada em temperaturas mais baixas, em comparação com o sinter e a pelota; **(ii)** menor consumo específico de sinter e pelota, com conseqüente menores gastos com modernizações e novas instalações, **(iii)** menor uso das mesmas menos poluição; redução do consumo de energia e impactos ambientais; **(iv)** utilização de carvões não coqueificáveis, pós e lamas de indústrias siderúrgicas que contém óxidos de ferro; **(v)** a reação de gaseificação do carbono e a redução do minério de ferro são aceleradas e ocorrem em temperaturas mais baixas, devido à maior superfície de contato entre os materiais; **(vi)** ocorre um aumento da permeabilidade do leito de fusão do alto-forno; **(vii)** proporciona aumento da produção devido a fusão mais rápida; **(viii)** melhor qualidade do gusa; **(ix)** redução de custos de produção; **(x)** redução do volume de escoria; **(xi)** redução dos passivos ambientais; **(xii)** reutilização dos finos totalmente; **(xiii)** redução das injeções por ventaneira.

**Figura 45 - Emprego de briquetes em fornos de redução**



Fonte: Kurunov, 2011

### 3.6.1 - Utilização de briquetes de Combustível e de Minério em Alto-Forno a Coque e a Carvão Vegetal

A adição de materiais auxiliares, sólidos, líquidos e gasosos em altos-fornos não é uma técnica nova. Os motivos que levaram determinada empresa a optar pela técnica são determinados por fatores ligados a um aumento de produção, aproveitamento de fontes energéticas naturais de baixo custo, aproveitamento de resíduos, melhoria na qualidade do gusa. (Souza,2008)

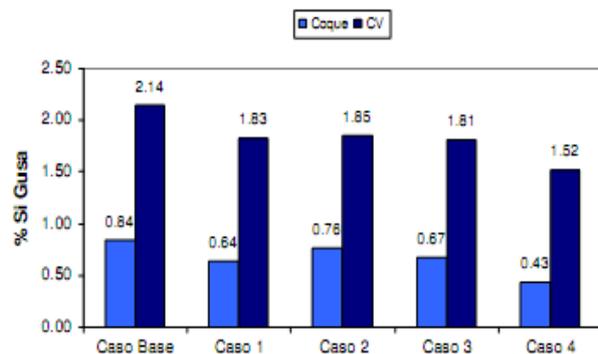
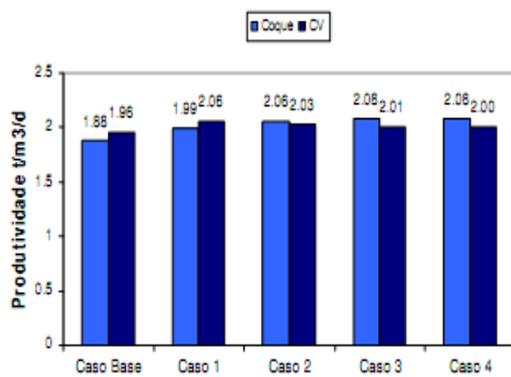
A Tabela 16 mostra os materiais utilizados na pesquisa de Souza (2008), carregando coque e carregando carvão vegetal: i) caso base - sem injeção de PCI e sem carga de briquete; ii) caso 1 - sem injeção de PCI e 20% de briquetes; iii) caso 2 - 100kg/ton gusa de PCI e sem carga de briquete; iv) caso 3 - 100kg/ton gusa de PCI e 5% de carga de briquete; v) caso 4 - 100kg/ton gusa de PCI e 20% de briquetes.

**Tabela 16** - Materiais carregados nas corridas com briquetes

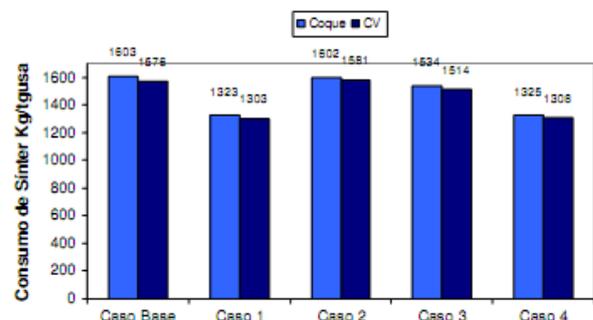
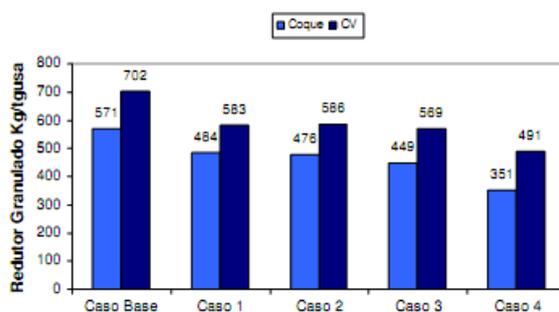
|                  | Sinter (%) | Aglomerado (%) | Injeção de Finos (kg/t) |
|------------------|------------|----------------|-------------------------|
| <b>Caso Base</b> | 100        | -              | -                       |
| <b>Caso 1</b>    | 80         | 20             | -                 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

Fonte: Souza,2008

As figuras 46 até 51 possibilitam uma melhor visualização do que ocorre em relação à produtividade, percentual de silício no gusa, consumo de sinter e redutor granulado (coque ou carvão vegetal), volume e basicidade da escória.

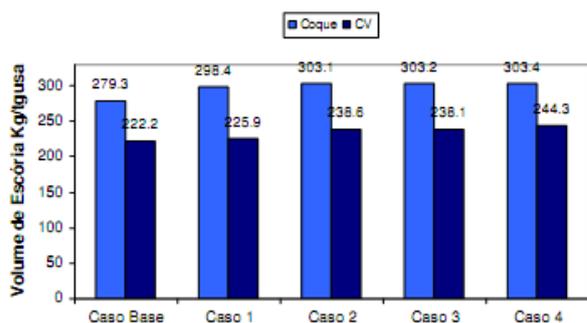


Fonte: Souza,2008

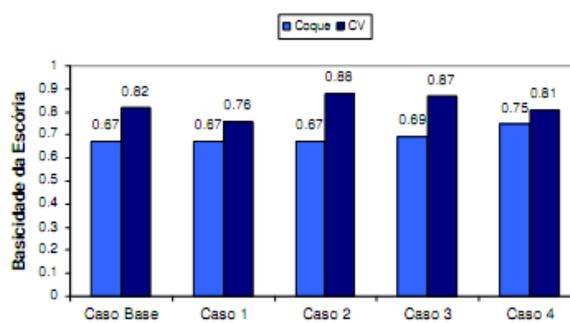
**Figura 46** – Produtividade AF**Figura 47** - % de Si no gusa

Fonte: Souza,2008

**Figura 48** – Consumo de redutor granulado**Figura 49** – Consumo de sinter



**Figura 50** – Volume de escória



**Figura 51** – Basicidade da escória

Fonte: Souza,2008

Analisando a figura 46 observa-se um acréscimo irrelevante da produtividade conforme aumenta-se a percentagem de aglomerados (tipo briquete) na carga, o acréscimo é pouco maior quando se combina a injeção de carvão pulverizado. Estes resultados foram almejados, pois em um primeiro momento não se deseja alterar significativamente as condições internas do reator devido a detalhes construtivos de refratários e equipamentos auxiliares, tais como: refrigeração da carcaça e capacidade de sopro. Com a injeção de PCI, a produtividade do caso carregado com coque passa a ser levemente maior que no caso carregado com carvão vegetal. (Souza, 2008)

Para o carvão vegetal, o volume interno ocupado pelo redutor aumenta e conseqüentemente menor volume de carga que contem ferro, assim, a área específica disponível para as reações de redução no estado sólido diminui. (Souza, 2008)

Com o uso de carga briquetada o consumo específico de redutor granulado, coque ou carvão vegetal, diminui (figura 48) devido principalmente à substituição deste elemento pelo carbono no interior do aglomerado nas reações de “solution loss”. Operando com carregamento de coque esta diminuição é mais acentuada, o que se justifica pela quantidade de voláteis presente no carvão vegetal. Os voláteis do carvão vegetal são liberados na zona granular do forno, o que causa uma demanda energética maior nesta região quando comparada ao coque, entretanto, permite um maior volume de gás redutor nesta região e conseqüentemente maior redução nesta zona. (Souza,2008)

Pela análise da figura 49 observa-se com a prática de carregamento de aglomerados tipo briquetes é possível diminuir o consumo de sinter em 280 kg por tonelada de gusa produzido. Os aglomerados por serem fabricados a partir de resíduos do próprio processo permitindo a diminuição do passivo ambiental de toda a cadeia produtiva. (Souza,2008)

Como se pode observar a operação com carvão vegetal (figura 50) produz um volume de escória por tonelada de gusa bem mais baixo acarretando num menor consumo de energia para fusão da escória e menor impacto ambiental com o resíduo escória, em contrapartida há um aumento substancial do teor de silício no gusa (figura 47). (Souza,2008)

No alto-forno a carvão vegetal, o redutor tem um baixo teor de cinzas (básicas), e o carregamento de enxofre é desprezível, o que permite a operação com um baixo volume de escória ácida ( $\text{CaO/SiO}_2 < 1,00$ ). Já no alto-forno a coque, o elevado teor de cinzas de caráter ácido (altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e o elevado nível de carregamento de enxofre, normalmente opera-se com um alto volume de escória básica ( $\text{CaO/SiO}_2 > 1,20$ ). Para possibilitar o carregamento de coque e carvão no mesmo forno, sem comprometer a vida útil do revestimento refratário, optou-se por manter nos dois casos, escória ácida, através da adição de quartizito na carga, quando operando com coque. A figura 51 mostra os resultados obtidos. (Souza,2008)

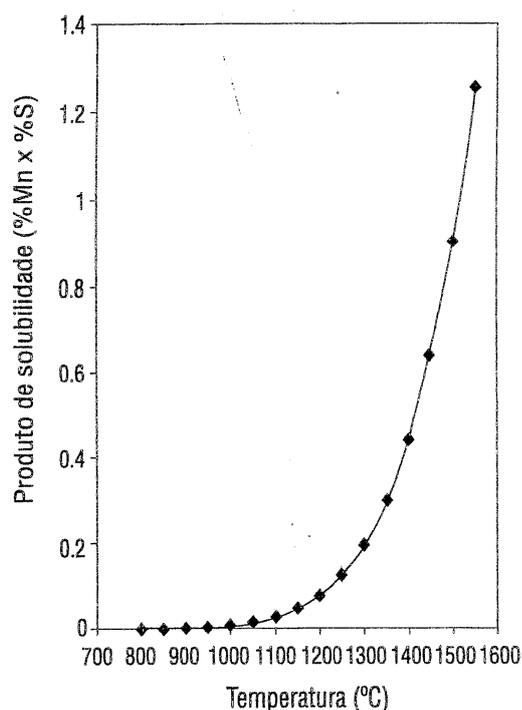
O uso de briquetes cria condições amigáveis e compatíveis para os dois processos visando ora operar com base em biomassa e ora operar com coque, garantindo alta flexibilidade de utilização do redutor. (Souza, 2008)

As exigências cada vez mais crescentes quanto às tenacidade dos aços, desde os de qualidade para estampagem profunda até os aços estruturais soldáveis, levam à necessidade de produzir materiais com baixos teores de elementos deletérios, tendo como critério a soma de S + P + N + O + H menores que 100 ppm em particular com enxofre até menores que 0,001%.

O uso de briquetes melhora a qualidade do ferro primário, no que diz respeito aos teores de enxofre e fósforo. A redução de óxidos de ferro no interior do alto-

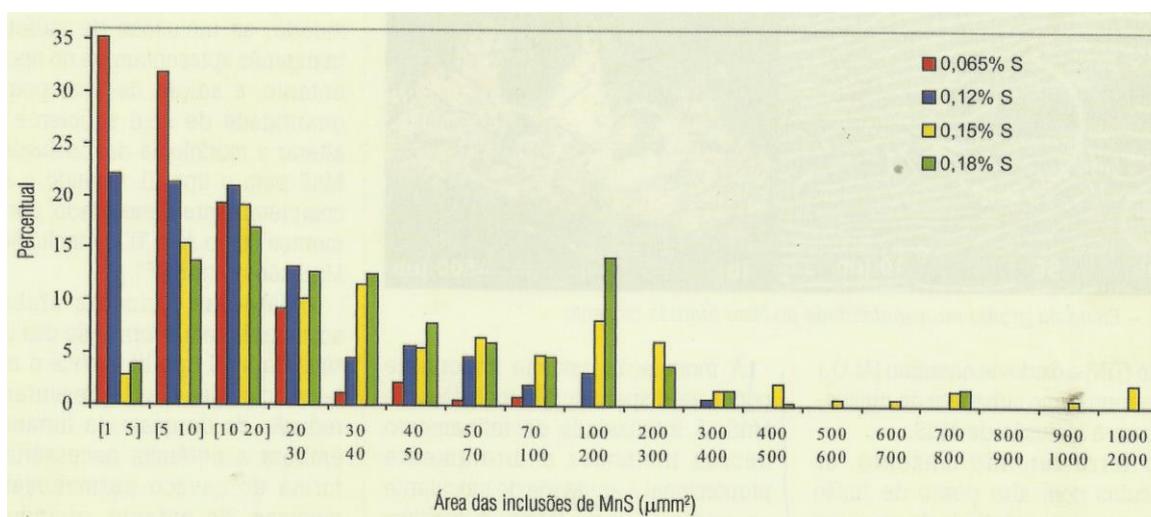
forno necessita de temperaturas suficientemente altas, tanto quanto de quantidades adequadas de matérias-primas de forma a produzir gusa com composição química dentro das especificações. Esta condição é totalmente favorável a transferência de enxofre para o ferro líquido, como mostra a Figura 52 , que forma inclusões nos aços e ferros como visto na Figura 53 , alterando sua resistência mecânica, conforme figura 54 .

**Figura 52** - Variação do produto de solubilidade do sulfeto de manganês (MnS)



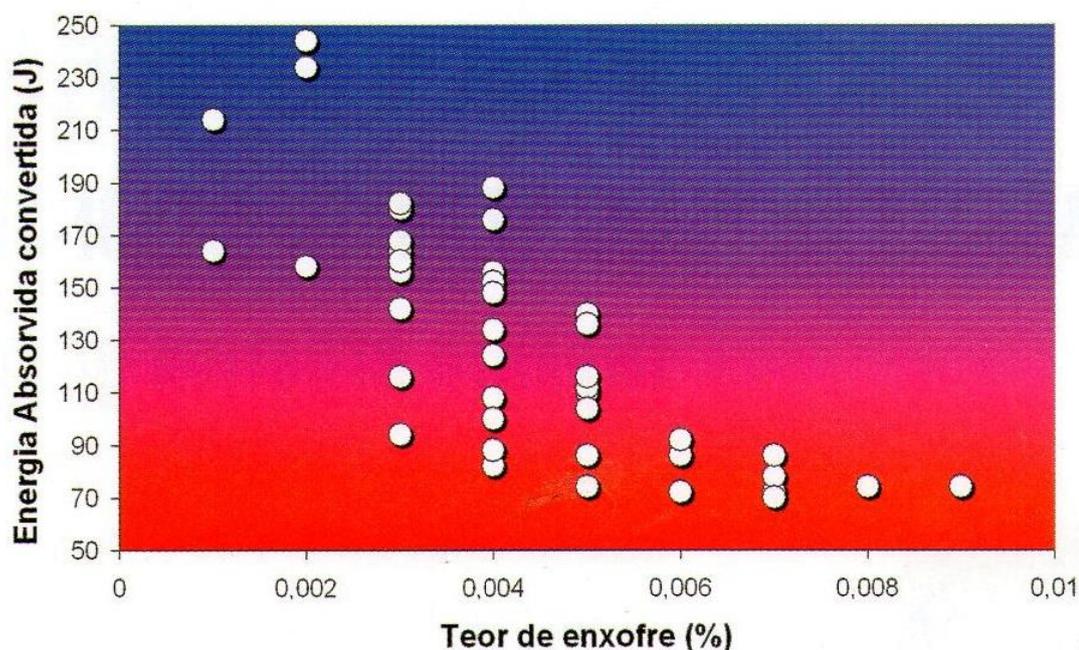
Fonte: Baptista, 2011

**Figura 53** - Distribuição da área das inclusões de MnS em material fundido



Fonte: Baptista, 2011

**Figura 54** - Influência do teor de enxofre na resistência do aço para tubos



Fonte: Baptista, 2011

Comumente, o coque de alto-forno contém em torno de 0,6% S (enxofre). Minérios granulados, sinter e pelotas contêm teores de enxofre que variam entre 0,001 e 0,01%. Um balanço típico de enxofre é apresentado na Tabela 17 .

**Tabela 17** - Balanço de enxofre típico para um alto-forno

| Enxofre(entrada) | kg/tgusa | Enxofre(saída) | kg/tgusa |
|------------------|----------|----------------|----------|
| Pelota           | 0,14     | Gusa           | 0,56     |
| Fundentes        | 0,52     | Escória        | 3,74     |
| Coque            | 2,31     | Pó             | 0,35     |
| Carvão           | 1,92     | Gás            | 0,24     |
| Total            | 4,89     | Total          | 4,89     |

Fonte: Matos, 2006

A maior parte do enxofre (cerca de 80%) é carregado no alto forno através do coque na forma de FeS e CaS presente nas cinzas do coque e como enxofre orgânico. O restante vem através dos outros materiais da carga. Para qualquer alto forno, cerca de 90 a 80% do enxofre saem na forma de escória, 10% a 15% saem

junto com o gás de topo, enquanto que 2% a 5% se dissolve no ferro gusa. (David, 2013)

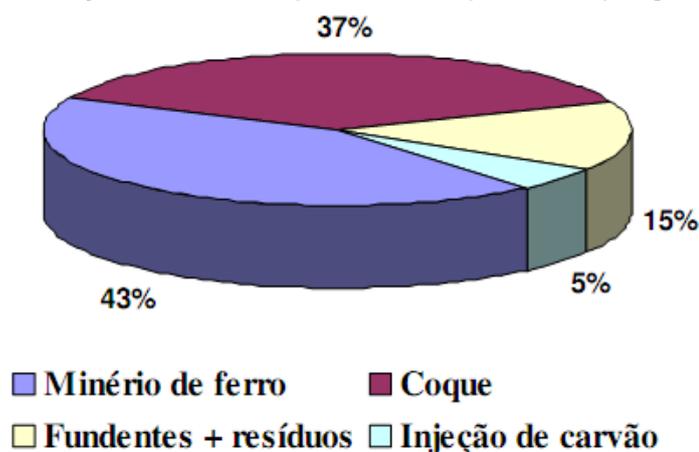
A tendência atual do mercado é de consumo de aços com teores cada vez mais baixos de enxofre. Com o contínuo crescimento da demanda por produtos de melhor qualidade superficial e melhores propriedades mecânicas, as especificações de enxofre final vem sendo progressivamente adaptadas para aços de baixo enxofre (0,010 a 0,015%) e extra baixo enxofre (0,005% a 0,008%).

Paralelamente, as siderúrgicas vem aumentando a produção de gusa com teores iniciais de enxofre mais elevados (0,035% a 0,045%). Esta tendência é resultado da redução de custo de produção, que pode ser obtido ao comprar carvão mineral com teores mais elevados de enxofre e/ou operar o alto-forno com maior flexibilidade em relação aos teores deste elemento, privilegiando a otimização da produtividade do equipamento.

Além do enxofre o fósforo também é uma impureza altamente deletéria ao aço, resultando em fragilidade a quente e frio, que tem origem na obtenção do ferro primário, em altos-fornos Figura 55

Através da Figura 55, tem-se a contribuição das principais matérias-primas para com os teores de fósforo incorporados ao ferro-gusa durante o processo de redução.

**Figura 55** - Distribuição do fósforo por matéria-prima empregada na siderurgia.

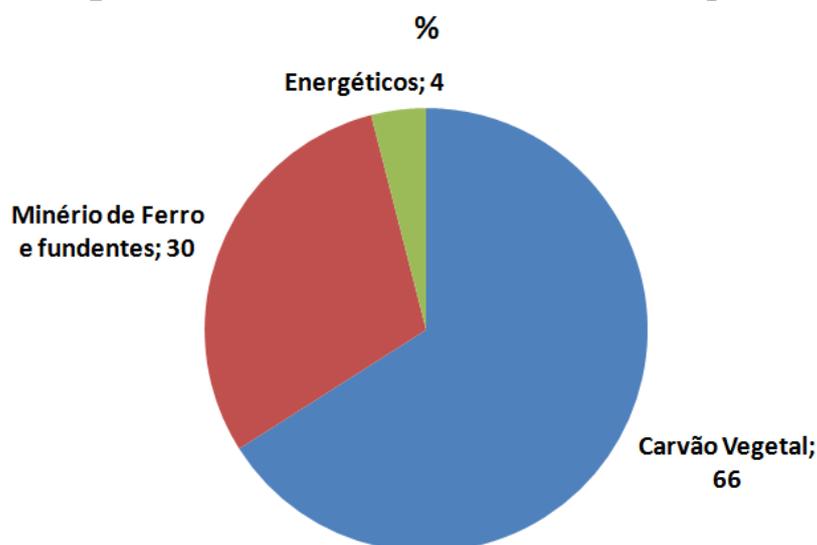


Fonte: Cunha, 2006

O uso de briquetes mesmo em pequenas quantidades em um alto-forno operando com 65% de sinter e 35% de minério, apresenta significativas vantagens, como: aumento de produtividade em 15%, redução do consumo de redutor em 10% e o aumento da permeabilidade conseguida na carga permite que o volume de sopro possa ser 10% maior. (Senk, 2005). A operação de altos-fornos é afetada por diversos fatores, entre eles um dos mais importantes é a permeabilidade do leito de fusão. De uma boa passagem dos gases (aerodinâmica) pela carga vão depender a produtividade do reator, o seu consumo de redutor (um fator crítico para redução de custo), bem como a qualidade do gusa. A vazão mássica dos gases quando aumentada pode significar maiores produções, a alteração da forma e granulometria dos materiais introduzidos no alto-forno (como os briquetes), implica na melhoria da permeabilidade de cerca de 1%, o ganho de produção do alto-forno pode ascender a 25% graças a maior separação que ocorre entre carga metálica e redutor. (Nepomuceno, 1996)

Os principais custos de produção das siderúrgicas são: carvão e coque, minério de ferro, ligas e níquel e sucata de aço. (Barros, 2016). A figura 56, como exemplo, mostra a distribuição de custo em alto-forno a carvão vegetal.

Para cada aumento de 1% de briquete na carga, ocorre: A redução de 0,76 Kg de volume de escória por tonelada de gusa, Redução de 2,16 Kg de carvão vegetal bruto / ton gusa, Redução de 1,55 kg de carvão vegetal enornado (topo) / ton de gusa,. Tendo como base os valores típicos de custo de insumos, mostrados na Tabela 18, tem-se uma idéia da economia gerada. Redução de R\$ 0,55 por tonelada no custo de gusa (Senk, 2005)

**Figura 56** - Custos em alto-forno a carvão vegetal

Fonte : Senk, 2005

**Tabela 18** - Valores típicos de custo de insumos

| Insumo         | Valor                           |
|----------------|---------------------------------|
| Coque          | US\$ 0,09/kg metal liquido      |
| Carvão         | US\$0,05 / kg                   |
| O <sub>2</sub> | US\$70.00 / 1000Nm <sup>3</sup> |
| Gás Natural    | US\$0,15 / Kg                   |
| Ar soprado     | US\$0,005 / Nm <sup>3</sup>     |

Fonte: Senk, 2005

Para ter uma visão da economia com o uso de briquetes, primeiramente vamos ver, as Tabelas 19 e 20 e Figuras 57 e 58 que mostram o consumo de matéria primas, em alto fornos a coque e a carvão-vegetal.

**Tabela 19 - Insumos em Altos-Fornos**

| Insumos                 | Unidade                      | Quantidade          |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| Minério de ferro        | Kg/ton de gusa               | 25 – 350            |
| Sínter                  |                              | 720 – 1480          |
| Pelotas                 |                              | 100 – 770           |
| Coque                   |                              | 280 – 410           |
| Carvão                  |                              | 0 - 180             |
| Materiais reciclados    |                              | 2 – 8               |
| Cal                     |                              | 0 – 10              |
| GAF (Gás de Alto Forno) | MJ/ton gusa                  | 1050 – 2700         |
| GCO (Gás de Coqueria)   |                              | 90 – 540            |
| Gás natural             |                              | 50 – 230            |
| Eletricidade            | MJ/t gusa (kWh/t gusa)       | 104 – 144 (29 – 40) |
| Vapor                   | MJ/t gusa                    | 22 -30              |
| Oxigênio                | m <sup>3</sup> / ton de gusa | 25 – 55             |
| Ar comprimido           |                              | 9 -11               |
| Água                    |                              | 0,8 - 50            |

Fonte: Costa, 2002

A Tabela 20 mostra os metálicos típicos usados para produção de gusa em altos-fornos em várias regiões do mundo.

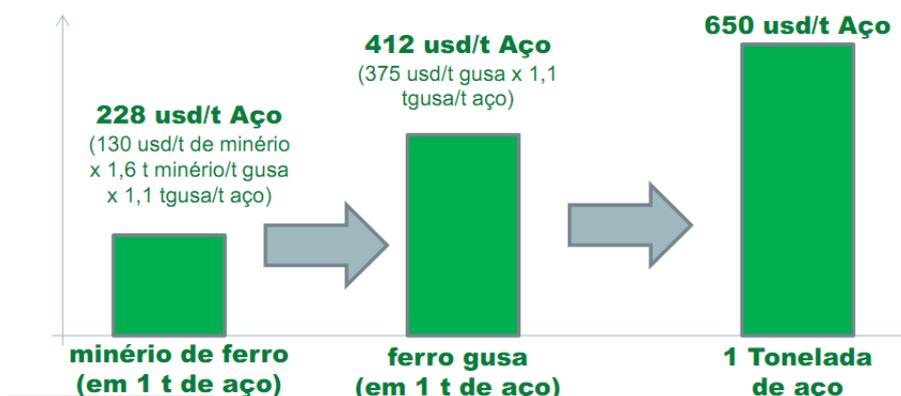
**Tabela 20 - Carga metálica usada em altos-fornos no Brasil e em alguns países**

| País                                      | Carga Metálica % |                   |        |
|-------------------------------------------|------------------|-------------------|--------|
|                                           | Sínter           | Minério Granulado | Pelota |
| EUA                                       | 10               | 3                 | 87     |
| Países Europeus                           | 65               | 15                | 20     |
| Japão                                     | 75               | 20                | 5      |
| China                                     | 75               | 19                | 6      |
| Brasil (usinas integradas)                | 75               | 20                | 6      |
| Brasil<br>(altos-fornos a carvão vegetal) | 0                | 100               | 0      |

Fonte: Costa, 2002

Nas figuras 57 e 58 pode-se ver uma comparação de custos da produção de gusa.

**Figura 57** - Valor equivalente entre minério, gusa e aço



Fonte: Correa, 2013

**Figura 58** - Comparação dos custos de alto-forno a carvão vegetal e a coque

| <b>Custo de Carvão Vegetal por t de gusa (US\$/t hot metal)</b> |                                   |               | <b>Custo de Coque por t de gusa (US\$/t de hot metal)</b> |                         |              |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Preço CIF de Carvão Vegetal de Reflorestamento                  | R\$/m <sup>3</sup> Carvão Vegetal | 129           | Carvão coqueificável                                      | US\$/t carvão           | 150          |
| Densidade                                                       | t/m <sup>3</sup> Carvão Vegetal   | 0,230         | Frete Oceânico                                            | US\$/t carvão           | 50           |
| <b>Preço CIF de Carvão Vegetal de Reflorestamento</b>           | <b>R\$/t carvão Vegetal</b>       | <b>560,87</b> | Taxa de Conversão                                         | t carvão/ t coque       | 1,5          |
| Taxa de Cambio                                                  | R\$/US\$                          | 2,25          | Custo Operacional                                         | US\$/t coque            | 50           |
| Preço do Carvão em dólares                                      | US\$/t                            | 249,28        | Frete Interno                                             | US\$/t coque ou PCI     | 10           |
| Consumo                                                         | t carvão/t hot metal              | 0,71          | <b>Preço CIF de Coque</b>                                 | US\$/t coque            | <b>360</b>   |
| <b>Custo de Carvão Vegetal</b>                                  | <b>US\$/t hot metal</b>           | <b>176,99</b> | <b>Preço CIF de Carvão PCI</b>                            | US\$/t carvão PCI       | <b>176</b>   |
| Crédito de PIS/Cofins                                           | US\$/t hot metal                  | 16,37         | Taxa de Coque                                             | t coque/t hot metal     | 0,4          |
| <b>Custo de Carvão Vegetal sem Impostos</b>                     | <b>US\$/t hot metal</b>           | <b>160,61</b> | Taxa de Carvão PCI                                        | t PCI/T hot metal       | 0,15         |
|                                                                 |                                   |               | <b>Custo de Coque sem Impostos</b>                        | <b>US\$/t hot metal</b> | <b>170,4</b> |

Fonte: Correa, 2013

Enquanto nos altos-fornos a carvão vegetal a carga ferrosa é constituída tipicamente por minério de ferro granulado, nos altos-fornos a coque a carga ferrosa principal é o sínter, na faixa de 65 a 85%. O restante é composto por minério de ferro granulado e ou pelotas. A distribuição desta alimentação nos EUA é de 256 kg sínter/t gusa (16%), 1296 kg pelotas/t gusa (81%), 48 kg minério de ferro/t gusa (3%), considerando carga total de 1600 kg/t gusa. Para a indústria brasileira temos

1326 kg sínter/t gusa (78%), 68 kg pelotas/t gusa (4%), 306 kg minério.fe./t gusa, considerando 1700 kg/t gusa.(Lemos, 2015)

Por possuírem carga metálica em um nível de ferro total (70 – 75%) superior aos das pelotas (65 – 66%) e do sínter (58%), os briquetes se mostram competitivos como matéria-prima para a carga do alto-forno. Para ser possível o atendimento ao alto-forno, um ponto importante seria se conhecer a resistência do briquete, às sucessivas quedas a que o material seria submetido até o seu consumo, em função do manuseio excessivo.(Duarte, 1996)

Com uso de briquetes pode-se diminuir a utilização de coque ou carvão de 20 à 40%; proporciona uma queda de aproximadamente 15% a mais de 30% na geração de escória no processo; diminuir o consumo de sínter em até 35%; reduzir o uso de minério de ferro em 16% à 20%, de calcário em 33% e de quartzo em 22%. (Petry, 2009)

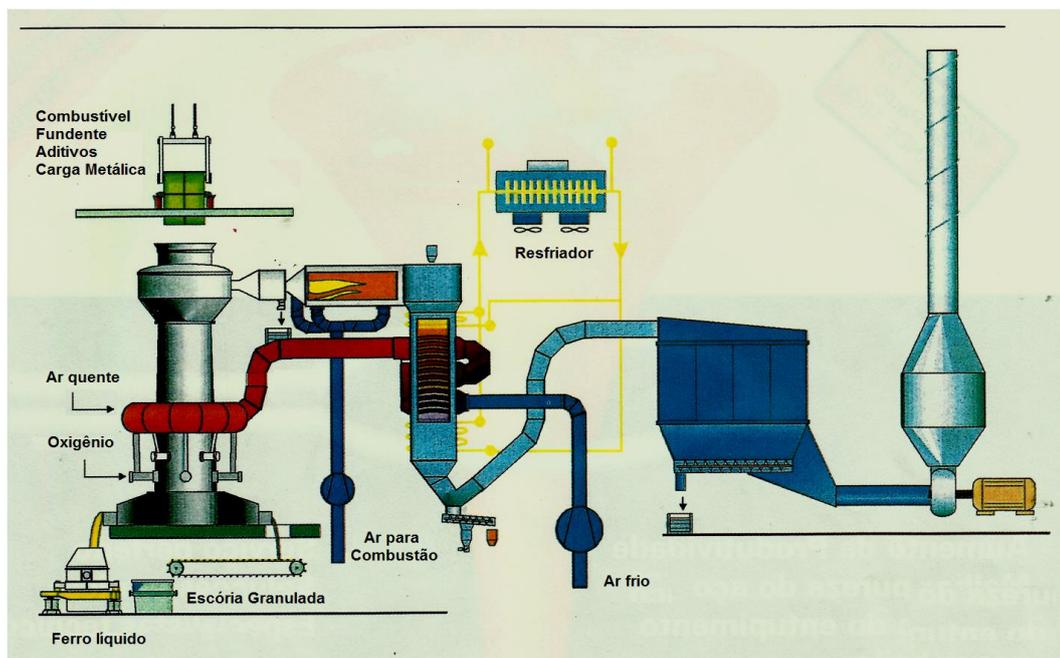
Apesar de extremamente eficientes e tecnicamente consolidados, os altos-fornos vem sofrendo crescentes pressões de ordem técnica, econômica e ambiental nas últimas décadas, o que tem levado o setor à uma busca incessante por alternativas que atendam as novas exigências da manufatura de ferro aço. · Baixos níveis de emissões gasosas; maior compatibilidade ambiental; maior eficácia no tratamento e na reciclagem dos resíduos gerados; maior flexibilização pra o uso das matérias-primas; baixos custos fixos; baixo custo de instalação, manutenção e ampliação; baixo custo operacional; flexibilidade para variar a escala de produção; (Sálvio, 2009)

O cenário social vigente fez desencadear uma lista de exigências da siderurgia moderna em torno dos processos atuais e futuros de produção, fazendo com que se busque rotas alternativas ao alto-forno (tecnologias emergentes da siderurgia primária) de produção de ferro base (gusa) utilizando-se de briquetes, devido as características pouco positivas do processo em alto-forno como uma alta escala de produção ( maior que 1.5 Mt/ano) não permitindo redução, necessidade de aglomeração do minério (sinter), necessidade de coque metalúrgico e elevada degradação do meio ambiente. Um processo ideal de redução deve usar finos de minério diretamente, usar qualquer tipo de carvão, eliminar etapas do

processamento, ser o mais contínuo possível, minimizar a dissolução de carbono e a incorporação de silício (permitindo eliminar etapas de refino), adaptável para diferentes matérias primas e diferentes níveis de produção, baixo custo de capital, baixo custo operacional. (Costa 2013)

Segundo Graf (1993) , não deverá existir um método de fusão que atingirá o monopólio da tecnologia mundial. O mundo avança para que haja mudanças e a escolha do método de fusão deve se basear nos seguintes parâmetros: (i) redução do impacto ambiental; (ii) conservação de energia; (iii) equipamentos compactos, sem grandes sistemas de suporte e com simplicidade de operação; (iv) flexibilidade operacional; (v) atender requisitos específicos da manufatura dentro dos custos compatíveis; (vi) arranjo produtivo com alta capacidade de reciclagem de rejeitos, sub-produtos (resíduos), principalmente no que tange ao retorno/reaproveitamento de finos.

Um outro forno (equipamento alternativo ao processo existente e que inclui-se entre as principais tecnologias emergentes na siderurgia mundial, atendendo os principais objetivos destes novos desenvolvimentos como ser ambientalmente amigável, permitir incremento da produção, baixo custo de investimento, flexibilidade na matéria prima de entrada, flexibilidade de produção, redução do consumo de energia, usar de uma forma mais eficiente todos os recursos disponíveis, utilização completa dos finos gerados, utilização de briquetes na carga, redução do uso de coque, sinter e pelotas) que emprega até 100% de briquetes é do tipo Oxycup (Figura 59), que é apontado como substituto do alto-forno. A Tabela 21 mostra a composição química do ferro gusa produzido através dos diferentes processos alternativos. O processo, segundo os seus promotores, se mostra extremamente eficiente para a utilização de resíduos siderúrgicos não recicláveis nos processos convencionais (fornos elétricos ou altos-fornos). (Passos, 2009)

**Figura 59** – Ilustração da unidade de fusão Oxycup

Fonte: Varnbüler (2007)

**Tabela 21** – Composição química do ferro gusa produzido através dos diferentes processos alternativos

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO GUSA |           |             |             |             |              |
|----------------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|                                  | C %       | Si %        | Mn %        | P %         | S %          |
| Alto Forno                       | 4,5       | 0,5         | 0,4         | 0,09        | 0,04         |
| ROMELT <sup>®</sup>              | 4 - 4,8   | 0,05 - 0,15 | 0,01 - 0,02 | 0,05 - 0,12 | 0,025 - 0,04 |
| AUSIRON <sup>®</sup>             | 2,5-4,2   | 0,02 - 0,04 | 0           | < 0,08      | 0,02 - 0,08  |
| TECNORED <sup>®</sup>            | 3,8 - 4,5 | 0,4 - 0,6   | 0           | 0           | < 0,05       |
| DIOS <sup>®</sup>                | 3 - 3,5   | < 0,05      | 0           | 0,05 - 0,1  | < 0,05       |
| HISMELT <sup>®</sup>             | 4,4       | < 0,01      | < 0,02      | 0,02        | 0,1          |
| FINEX <sup>®</sup>               | 4,5       | 0,65        | 0           | 0           | 0,034        |
| PRIMUS <sup>®</sup>              | 4,3 - 5,1 | 0 - 0,1     | 0,4 - 1,1   | 0,05 - 0,15 | 0,05 - 0,15  |
| COREX <sup>®</sup>               | 4,5       | 0,3         | 0           | 0,15        | 0,05         |
| OXYCUP <sup>®</sup>              | 4         | 0,6         | 0,2         | 0,1         | 0,1          |

Fonte: Passos, 2009

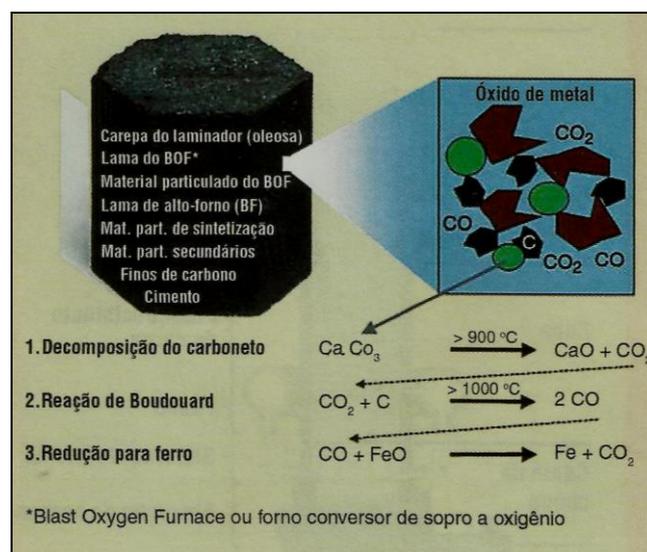
As principais vantagens do processo: O processo não demanda grandes alterações, em usinas já existentes, para a sua implantação; Baixos custos de investimento; Processo similar aos altos-fornos; Uso de resíduos siderúrgicos como matéria-prima; Flexibilidade de produção. (Passos, 2009)

As nova tecnologia dispensa a coqueria e a sinterização duas etapas da cadeia siderúrgica que exige grande investimento e representam grande parte das emissões atuais de uma usina integrada. Outro fato é que se usa briquete que

concorre diretamente com a pelota que é mais cara com processo mais complexo que também gera finos. Assim, consumindo menos energia é possível conter, igualmente, as emissões de gases e particulados, além de aumentar a produtividade da operação. A importância desta nova tecnologia reside justamente na comprovação da chamada convergência metalúrgica (onde os fundamentos do projeto estão no conceito da autorredução), onde um processo promete apresentar, a um só tempo, menos investimento (capex), menor custo de operação (opex), flexibilidade técnico-operacional e maior compatibilidade ambiental. Inovar é fazer algo diferente que tenha importância para os outros e proporciona ganhos a empresa. O mundo está mudando. Hoje, respeito e equilíbrio são tão fundamentais para o progresso quanto os minérios e suas aplicações. O único desenvolvimento viável é aquele que é realmente sustentável. (D'Abreu, 2001)

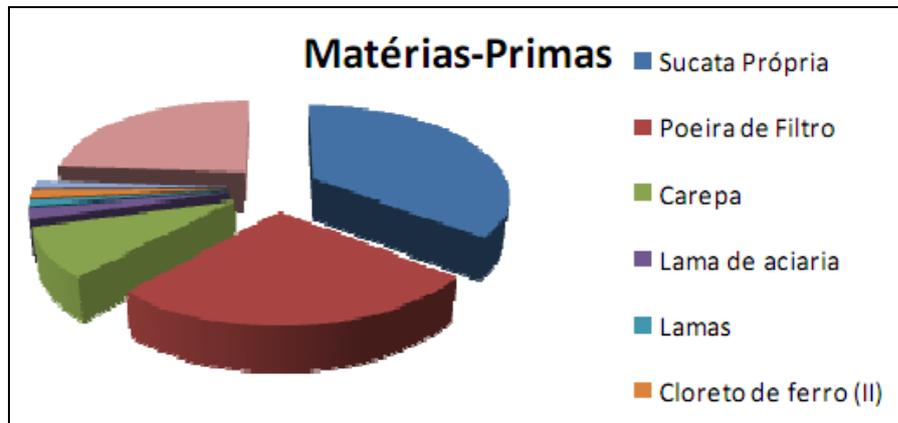
A Figura 60 mostra a composição do briquete Tipo – C, a Figura 61 os materiais que podem ser carregados neste forno. A figura 62 a evolução da fusão dos briquetes. A Figura 63 o ciclo de reaproveitamento de finos; a Figura 64 a geração de energia pelo processo e a Figura 65 o trabalho de substituto do alto-forno. A figura 66 a usina de fabricação de tubos a partir de briquetes.

**Figura 60** - Composição e reações de auto-redução em briquete tipo C



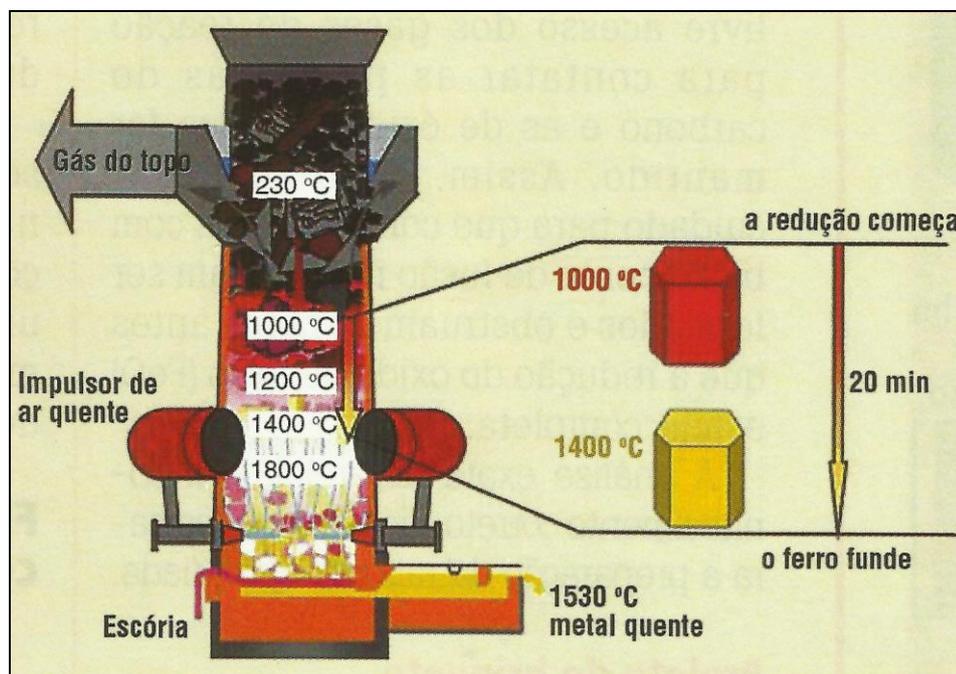
Fonte : Varnbüler (2007)

**Figura 61** - Distribuição de matérias-primas alimentadas no forno Oxycup



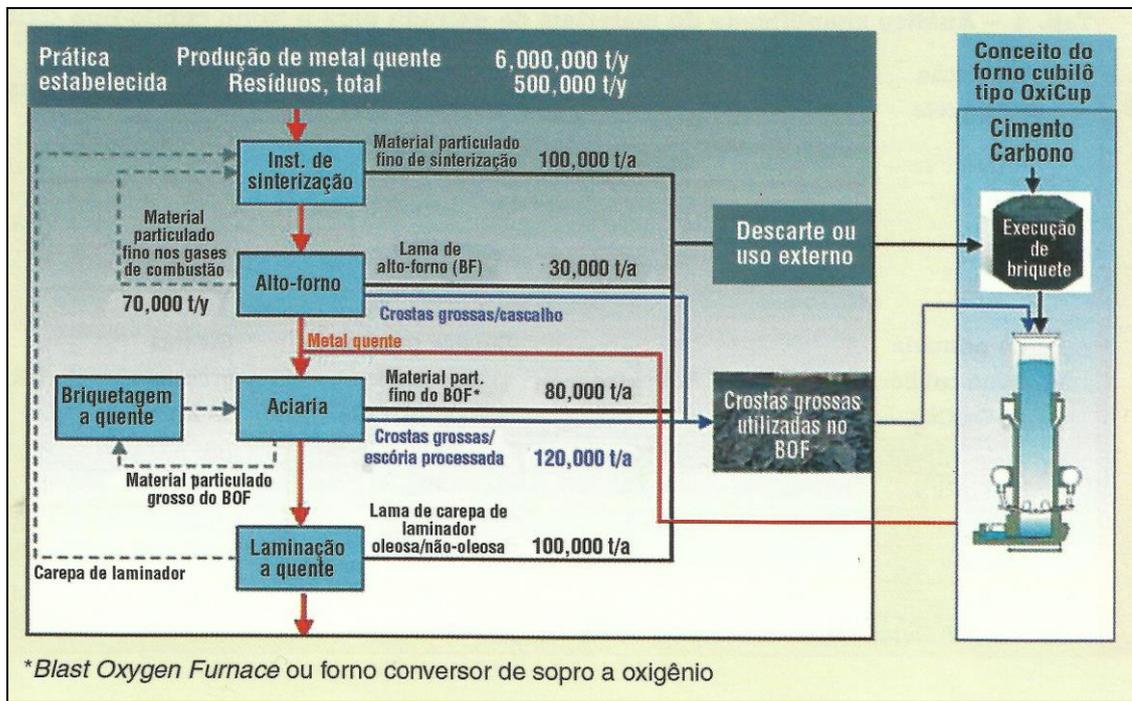
Fonte: Passos (2009)

**Figura 62** - Faixa de temperatura e de tempo para a redução do FeO, no briquete tipo C



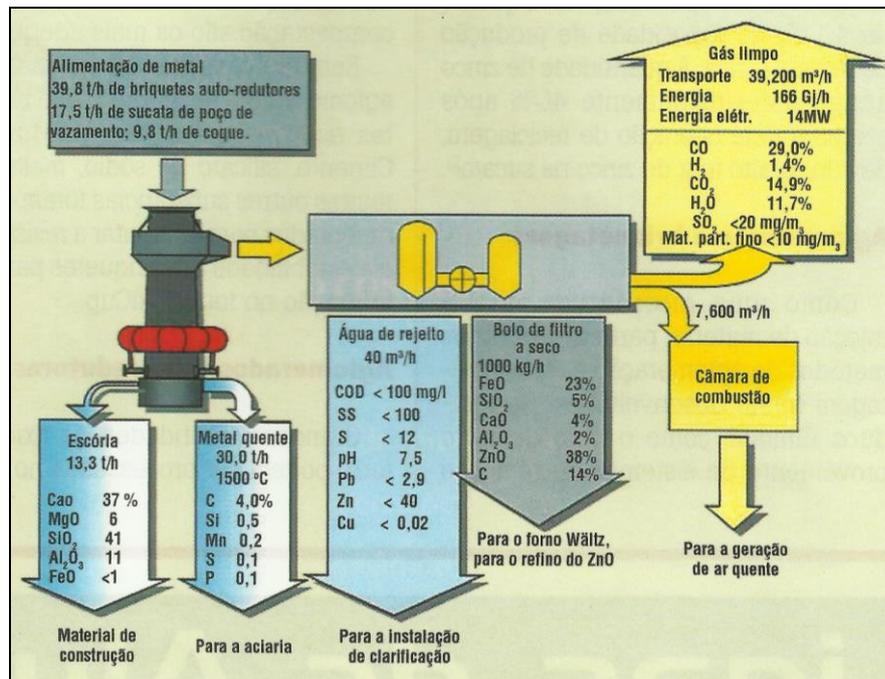
Fonte: Varnbüler (2007)

**Figura 63** - Conceito de rejeito zero para uma usina siderúrgica integrada típica operando com Oxícup



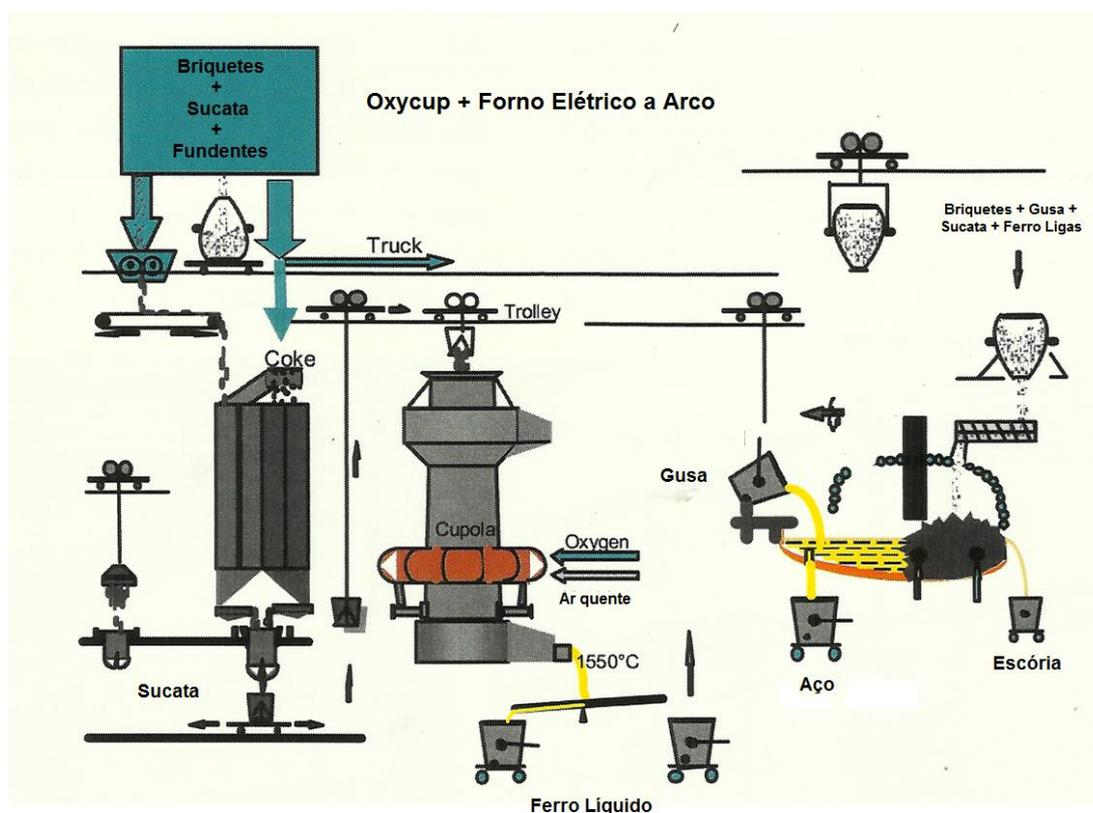
Fonte: Varnbüler (2007)

**Figura 64** - Fluxos de material e transporte dos gases para a co-geração de energia



Fonte: Varnbüler (2007)

**Figura 65** - Representação ilustrada do trabalho conjunto do Oxicup alimentando o forno a arco em uma mini-usina siderúrgica

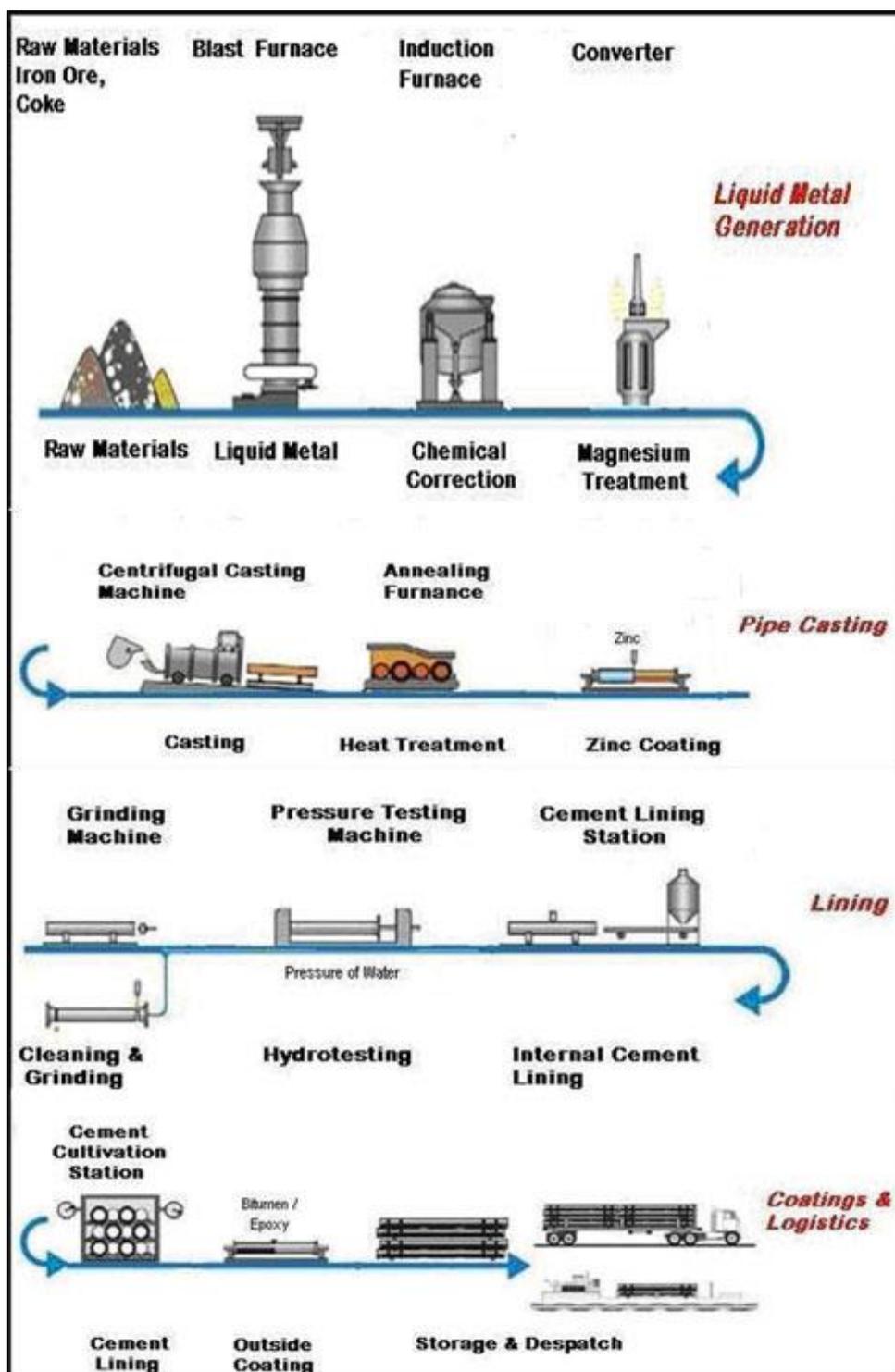


Fonte: Baptista (2010)

### 3.7 - Impactos Ambientais do Uso de Briquetes

Existem basicamente dois processos para obtenção de aço, sendo o processo com fornos a oxigênio aquele que utiliza de 25% a 35% de material reciclado e o aço produzido é aplicado em produtos que requerem características de estampabilidade, como peças automotivas e embalagens, e aqueles com fornos elétricos, que utilizam quase 100% de fonte de ferro reciclado e o aço produzido nesse caso é aplicado em situações que requerem alta resistência dos materiais, como estruturas metálicas para construção, barras de reforço etc. Sendo assim a taxa de reciclagem de material ferroso de forma geral é de 47% e a média anual registrada é de 88%. (Medina, 2006)

**Figura 66** - Fluxograma da produção de tubos centrifugados partindo-se do metal primário produzido em forno OxyCup utilizando-se de briquetes na carga.

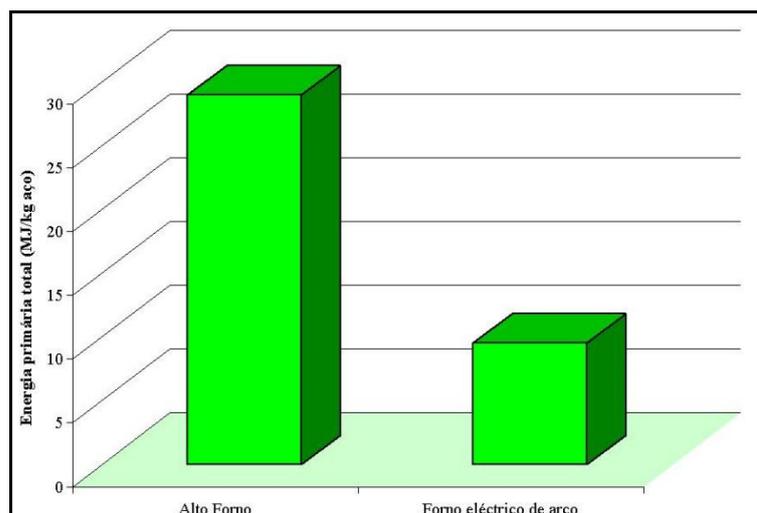


Fonte: Thacker (2015)

Facilmente se entende que os diferentes processos de produção de aço conduzem a consumos de energia bastante diferenciados. Enquanto que o consumo

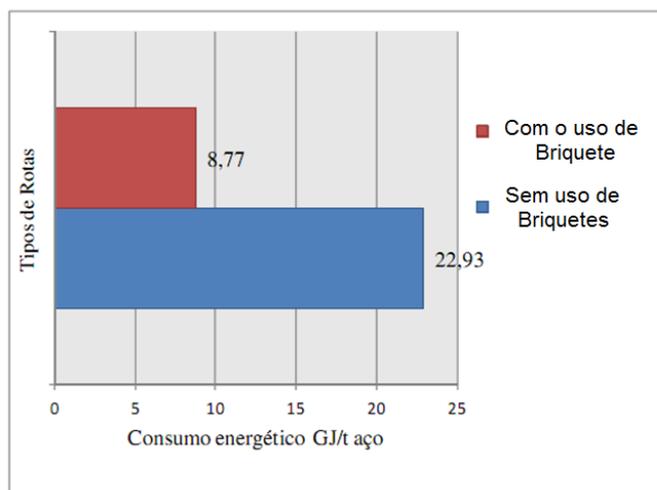
de energia na produção em alto-forno é de aproximadamente 29 GJ por tonelada de aço, na produção em forno de arco elétrico esse consumo é de cerca de 10 GJ (Figura 67) (Gervásio, 2006). A figura 68 mostra o consumo de energia da fabricação do aço com e sem briquetes.

**Figura 67** – Energia consumida por processos de produção de aço com o uso de briquetes



Fonte: Gervásio (2006)

**Figura 68** - Energia consumida na cadeia siderúrgica de fabricação de aço com e sem briquetes



Fonte: Senk (2005)

Em consequência das diferentes percentagens de ferro reciclado (em qualquer forma) utilizadas nos processos de produção de aço descritos anteriormente, facilmente se poderá constatar que as correspondentes emissões de carbono e de outras partículas são também consideravelmente inferiores para o forno de arco elétrico, tornando este um processo mais eficiente em termos ambientais. Em cada tonelada de material portador de ferro reciclado são poupados 1.25 toneladas de minério de ferro, 630 kg de carvão e 54 kg de calcário. (Gervásio,2006)

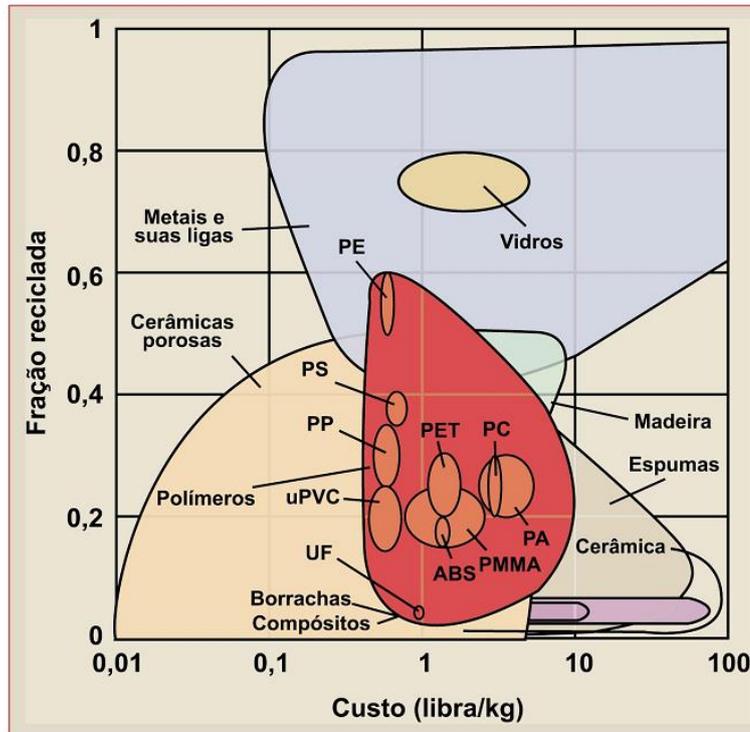
Além do mais, o processo de reciclagem requer menos energia, cria menos resíduos e provoca a emissão de menos quantidades de partículas poluentes do que a produção da mesma quantidade de aço a partir de matérias-primas. (Medina,2006) A Tabela 22 mostra as vantagens da reciclagem. Na figura 69 temos o diagrama de Ashby em termos de preço de materiais reciclados. A figura 70 mostra a geração de finos por minério e a Figura 71 mostra o potencial de reciclagem de finos por matéria prima, pontos que justificam o uso de briquetes.

**Tabela 22** - Benefícios ao meio ambiente gerados pela utilização de materiais reciclados em comparação aos recursos virgens

| <b>Redução de</b>     | <b>Alumínio %</b> | <b>Ferro ou Aço %<br/>(Produto / Rejeito)</b> | <b>Papel %</b> | <b>Vidro %</b> |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------------|----------------|
| Uso de Energia        | 90-97             | 47-74                                         | 23-74          | 4-32           |
| Poluição do Ar        | 95                | 85                                            | 74             | 20             |
| Contaminação da Água  | 97                | 76                                            | 35             | -              |
| Rejeitos de Mineração | -                 | 97                                            | -              | 80             |
| Uso de água           | -                 | 40                                            | 58             | 50             |

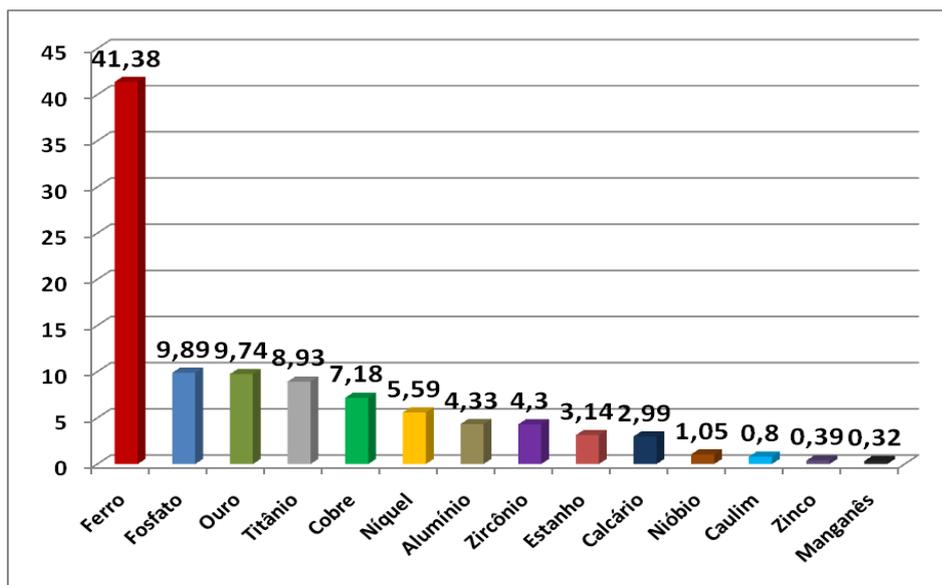
Fonte : Souza (1998)

**Figura 69** – Diagrama de Ashby mostrando a relação entre os preços dos diversos materiais de engenharia as suas frações recicladas.

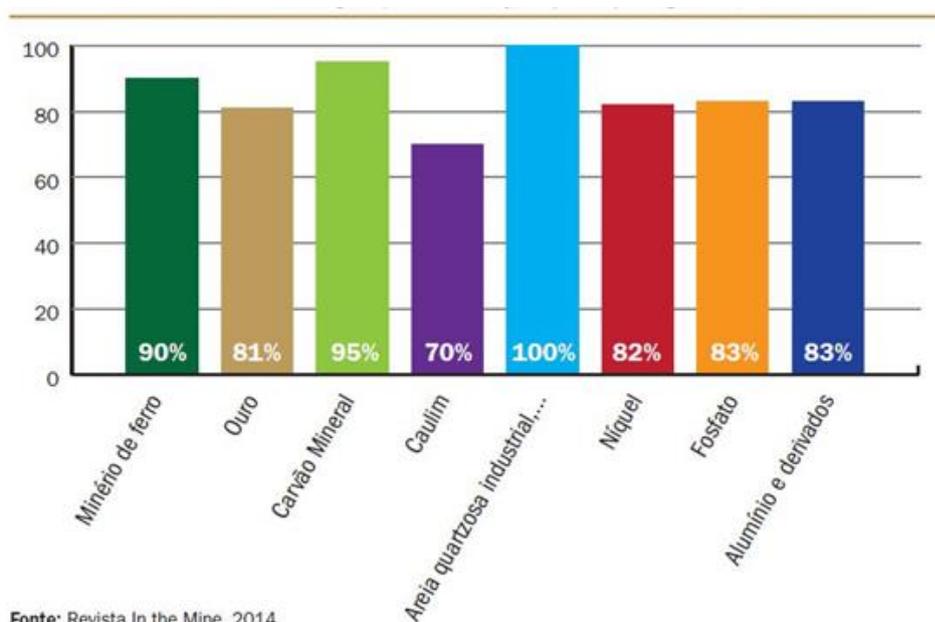


Fonte: Gorni (2006)

**Figura 70** - Contribuição média de cada substância (na produção de finos) para o período de 2010 – 2030



Fonte: IBRAM (2015)

**Figura 71** - Índice de reciclagem/recirculação por tipologias de minérios

Fonte: IBRAM (2015)

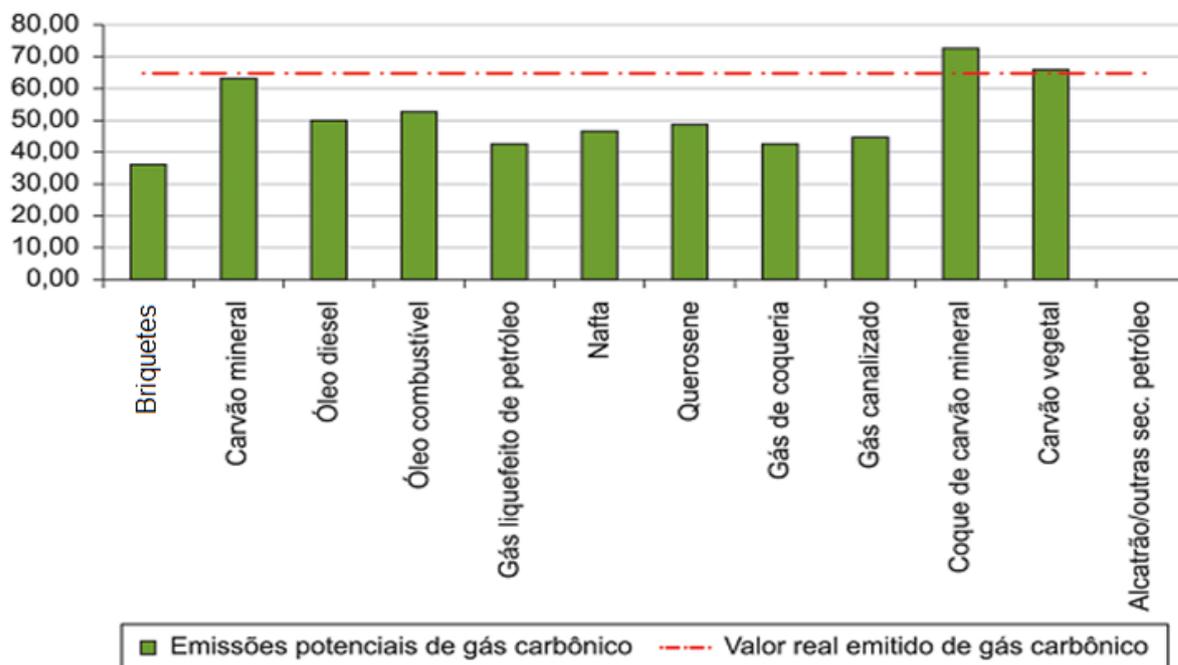
Dentre as emissões de partículas poluentes destacam-se as emissão de CO<sub>2</sub>. a Tabela 23 compara os dois processos concorrentes Alto-forno e Oxycup. As figuras 72 e 73 mostram as emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao material combustível e a Figura 74 as emissões nas siderúrgicas do mundo com e sem uso de briquetes. As figuras 75 e 76 o desempenho ambiental do alto-forno com o emprego de briquetes na carga.

**Tabela 23** - Consumo de carbono e emissão de CO<sub>2</sub> na produção de ferro primário líquido em altos-fornos e no processo emergente/alternativo Oxycup.

| Material utilizado nos fornos e Pontos de Carbono consumidos, Kg/t de metal líquido | Composição da Carga do Alto-Forno |                     |                                 |                                | Processo Oxycup |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|
|                                                                                     | Sínter e Pelotas                  | Briquetes e Pelotas | DRI (Fastmet), sínter e pelotas | DRI (Waeltz), sínter e pelotas |                 |
| Produção de Sínter                                                                  | 65                                | -                   | 14                              | 14                             | -               |
| Produção de Pelotas                                                                 | 2,5                               | 15                  | 13                              | 13                             | -               |
| Produção de DRI (Direct Iron Reduction)                                             | -                                 | -                   | 71                              | 393                            | -               |
| Composição dos Briquetes                                                            | -                                 | 108                 | -                               | -                              | 262,5           |
| Composição do DRI                                                                   | -                                 | -                   | 4,5                             | 4,5                            | -               |
| Coque                                                                               | 315                               | 277                 | 285                             | 285                            | 263             |
| Gás Natural                                                                         | 56                                | 28                  | 50                              | 50                             | -               |
| Conteúdo de Oxigênio no Alto-Forno C/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>                  | 11,5                              | -                   | 9                               | 9                              | 39              |
| <b>Consumo de carbono</b>                                                           | 451                               | 428                 | 446,5                           | 768,5                          | 564,5           |
| <b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>                                                    | 1654                              | 1569                | 1674                            | 2818                           | 2070            |

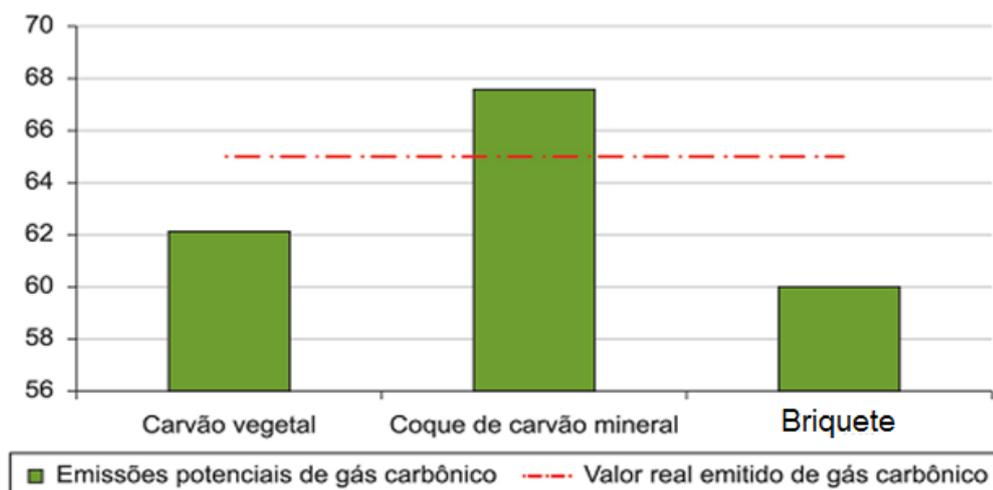
Fonte: Kurunov (2011)

**Figura 72** - Emissões de CO<sub>2</sub> supondo o consumo de apenas um combustível (em 10<sup>6</sup>t de CO<sub>2</sub>).



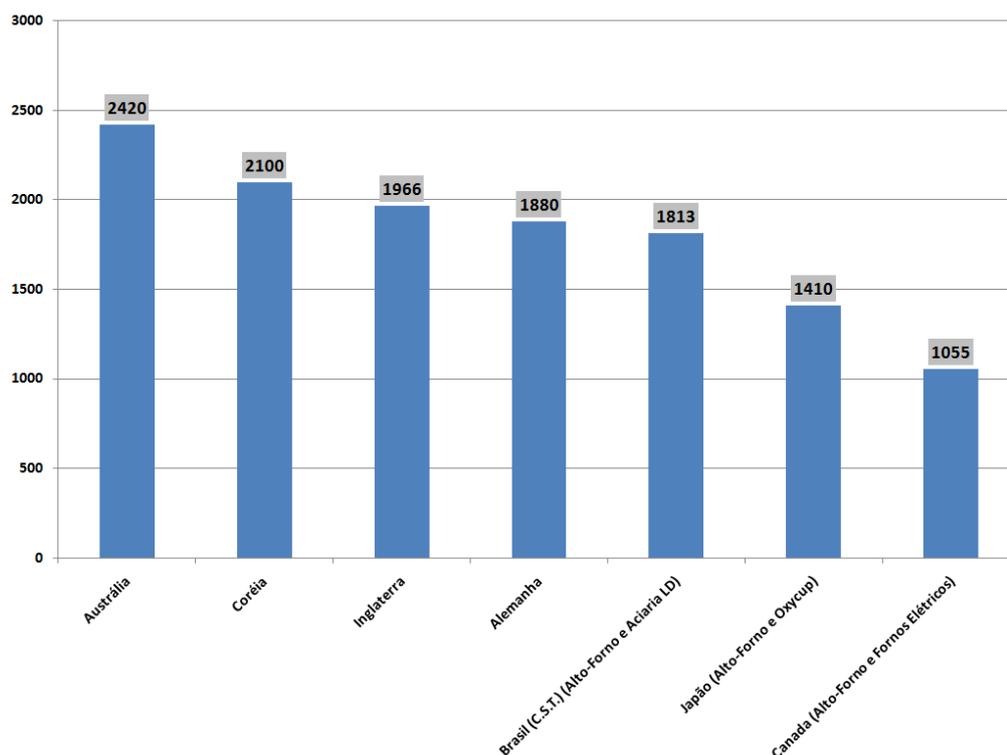
Fonte: Petry (2009)

**Figura 73** - Emissões totais de CO<sub>2</sub> supondo substituição de dois combustíveis sólidos (em 10<sup>6</sup>t de CO<sub>2</sub>)



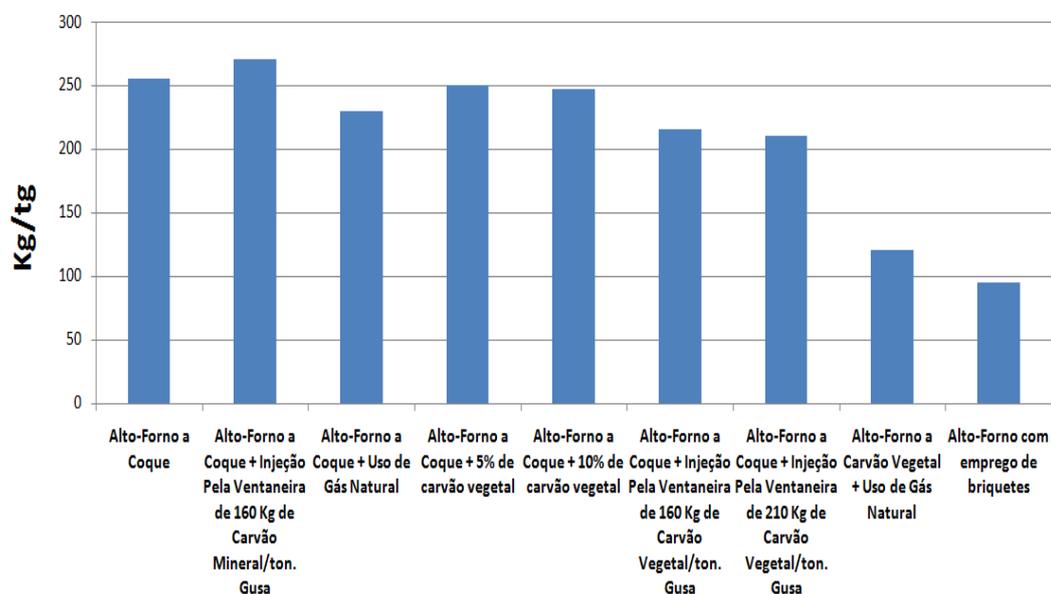
Fonte: Petry (2009)

**Figura 74** - Taxa de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas siderúrgicas do mundo em Kg CO<sub>2</sub>/T aço líquido, Brasil, Japão e Canadá empregam briquetes na carga dos fornos



Fonte: Endemann (2015)

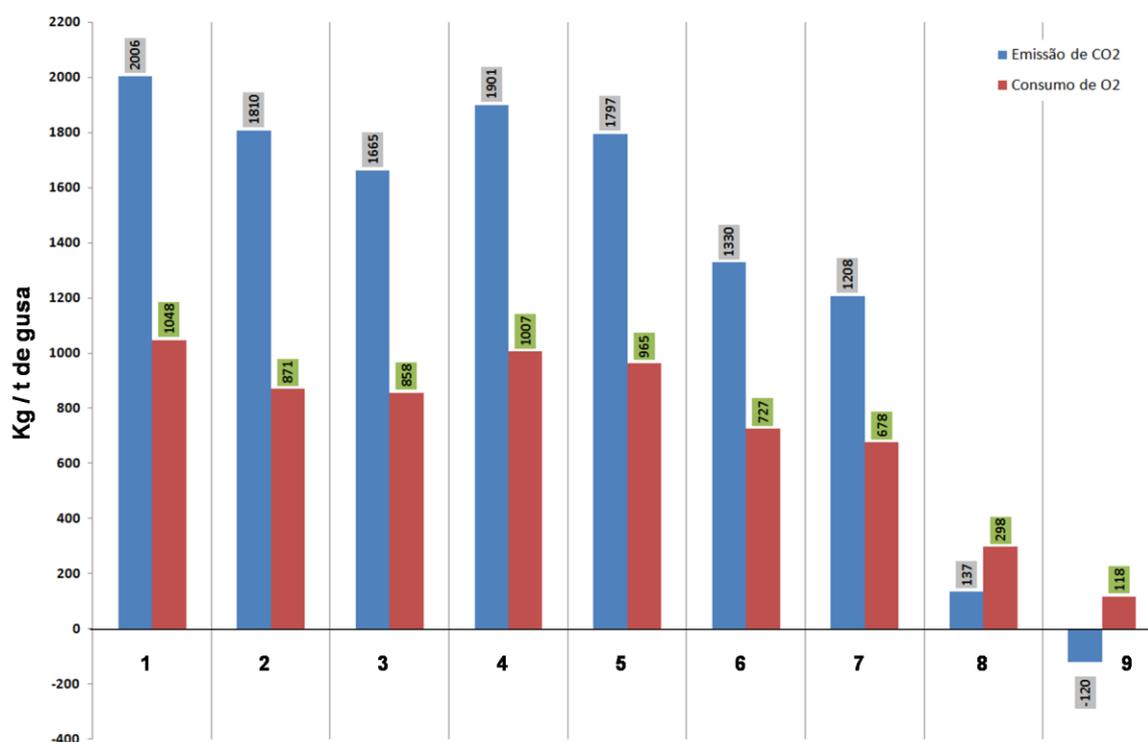
**Figura 75** – Resultados obtidos com a utilização de briquetes em Alto-Forno  
Geração volumétrica de escoria em cada cenário de operação



Fonte: Endemann (2015)

**Figura 76** - Desempenho ambiental do alto-forno com o uso de matéria prima reciclada na forma de briquetes. (1-Alto-Forno a Coque, 2-Alto-Forno a Coque + Injeção Pela Ventaneira de 160 Kg de Carvão Mineral/ton. Gusa, 3-Alto-Forno a Coque + Uso de Gás Natural, 4-Alto-Forno a Coque + 5% de carvão vegetal, 5-Alto-Forno a Coque + 10% de

carvão vegetal, 6-Alto-Forno a Coque + Injeção Pela Ventaneira de 160 Kg de Carvão Vegetal/ton. Gusa, 7-Alto-Forno a Coque + Injeção Pela Ventaneira de 210 Kg de Carvão Vegetal/ton. Gusa, 8-Alto-Forno a Carvão Vegetal + Uso de Gás Natural, 9-Alto-Forno com emprego de briquetes)

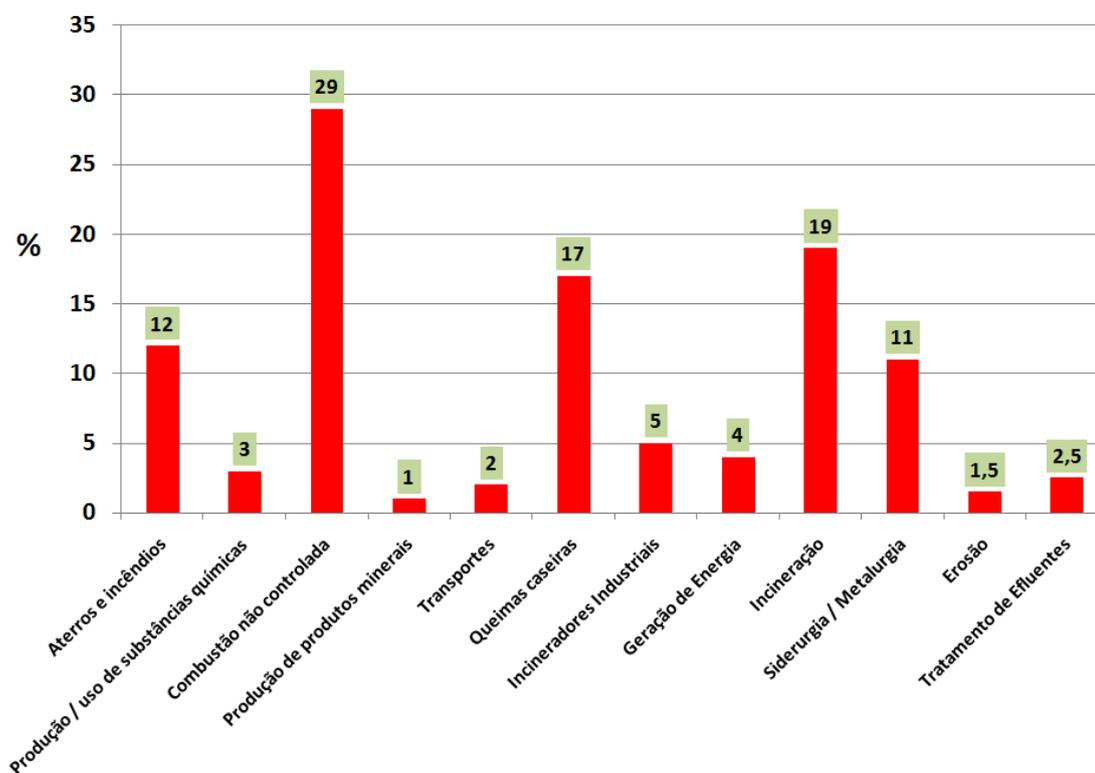


Fonte: Endemann (2015)

Conforme cita Castro (2007), uma questão problemática é o processo de produção de sinter de minério de ferro que é bastante complexo e envolve vários fenômenos. As matérias-primas são variadas em sua composição química e, via de regra, se utiliza reciclagem de resíduos de outros processo introduzindo impurezas que em geral demandam cuidados adicionais do ponto de vista do controle do processo e de emissões. Dioxinas e furanos são substancias classificadas de alta toxicidade e são produzidas em pequenas concentrações em processos que envolvem combustão na presença de compostos clorados mesmo em baixíssimas concentrações, como mostrado na Figura 77. Devido a flexibilidade de uso de materiais, baixo consumo energético e alta produtividade a sinterização acabou por se destacar, durante muito tempo, como principal fornecedor de craga para o alto-forno. Não obstante, este processo representa uma das fontes poluidoras mais importantes na siderurgia envolvendo emissões gasosas e de particulados, além de

compostos organoclorados de alta toxicidade. O emprego de briquetes reduz esta contaminação devido diminuir a produção de sínter.

**Figura 77 - Emissão de dioxinas e furanos por fonte geradora**

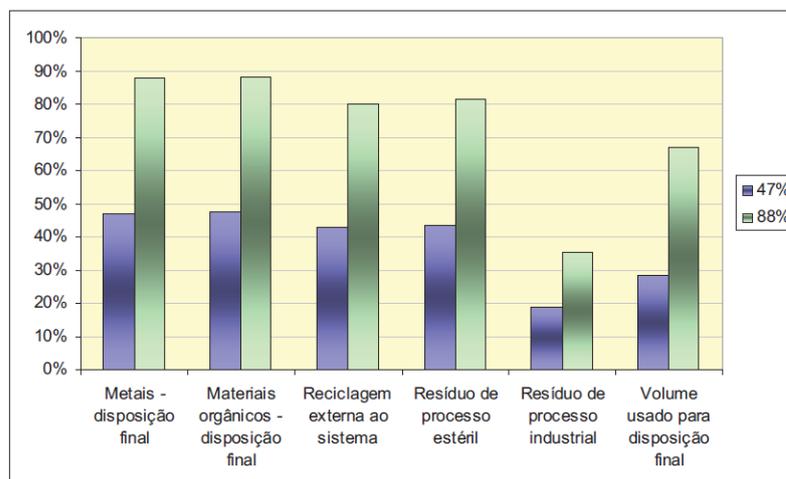


Fonte : Castro (2007)

A Figura 78 ilustra a redução das emissões de resíduos sólidos em função da taxa de reciclagem. O parâmetro reciclagem externa ao sistema inclui os subprodutos dos processos produtivos com valor comercial, mais os resíduos de processo que são reciclados, porém fora das fronteiras consideradas. No item resíduo de processo industrial estão contabilizados os resíduos sólidos inertes, não inertes e tóxicos gerados pelos processos industriais e no item resíduo de processo industrial estéril está relacionado à mineração de calcário e de ferro. O item volume usado para disposição final, refere-se ao volume ocupado em aterros industriais pelos resíduos de processo industrial e pelo resíduo de processo estéril e em aterros sanitários, aterros controlados e "lixões", pelo resíduo da lata de aço pós-consumo, calculado considerando a densidade aparente do resíduo, estimada conforme o material, e se há ou não compactação do lixo nos aterros ou no "lixão". Verifica-se que todos os resíduos sólidos gerados no processo produtivo do aço anteriormente às etapas de laminação como resíduo estéril e resíduo de processo industrial

sofreram grandes reduções com a introdução de aço reciclado ao processo. Os resíduos decorrentes da disposição final das latas pós-consumo foram reduzidos na mesma proporção das taxas de reciclagem avaliadas, ou seja, 47% e 88%. (Moreira,2009)

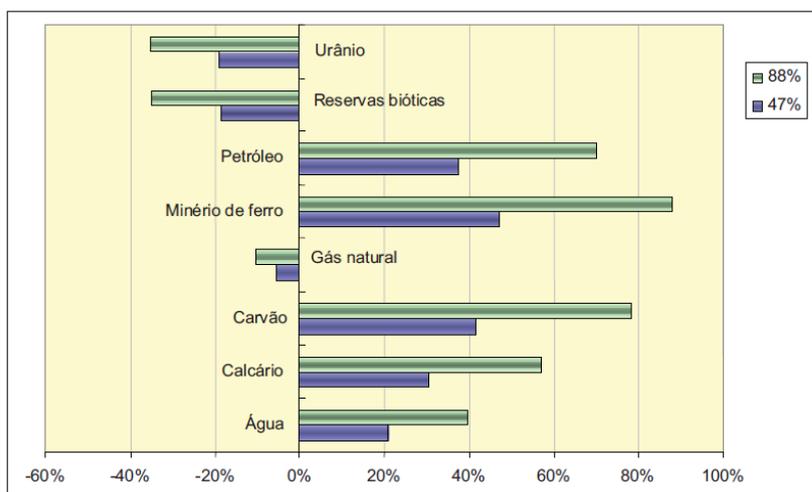
**Figura 78** – Redução de resíduos sólidos com a reciclagem de material rico em ferro (briquetes)



Fonte: Moreira, 2009

A Figura 79 ilustra a redução no consumo de recursos naturais em função da taxa de reciclagem ou da percentagem de uso de briquetes.

**Figura 79** – Redução no consumo de recursos naturais com a reciclagem



Fonte: Moreira, 2009

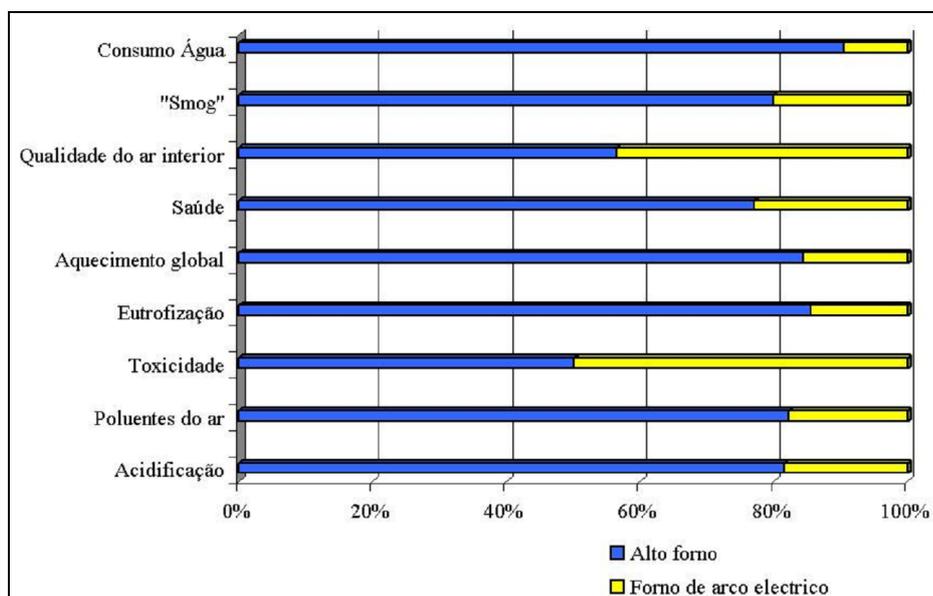
Analisando o trabalho de Moreira (2009) nesse grupo os itens quantificados são água e matérias primas básicas, para confecção dos produtos e para fabricação dos combustíveis. Petróleo e gás natural são os recursos naturais usados para

transporte e produção de energia. Carvão foi quantificado como combustível e como matéria-prima para a produção de coque. O consumo de urânio diz respeito à parcela de energia de fonte nuclear que compõe a energia elétrica da rede pública brasileira. Verifica-se que o consumo de água apresentou economia da ordem de 21% e 40%, respectivamente em relação às taxas de reciclagem de 47% e 88% e que, com exceção do gás natural, reservas bióticas e urânio, que tiveram seu consumo aumentado em função do processo de reciclagem, o qual utiliza gás natural para geração de calor e energia elétrica da rede pública, todos os outros recursos avaliados apresentaram diminuição significativa (relativamente, proporcional) do consumo em função da taxa de reciclagem na cadeia do aço.

De acordo com os resultados obtidos, é possível chegar a seguinte conclusão: os resultados mostraram que o esforço da reciclagem traz benefícios não só na redução dos impactos decorrentes da disposição final em barragens ou aterros como também representa significativa redução no uso de água, de energia, de recursos naturais e nas emissões para o ar, água e solo associadas às etapas de produção do aço, anteriores aos processos de fabricação do produto final. (Moreira,2009)

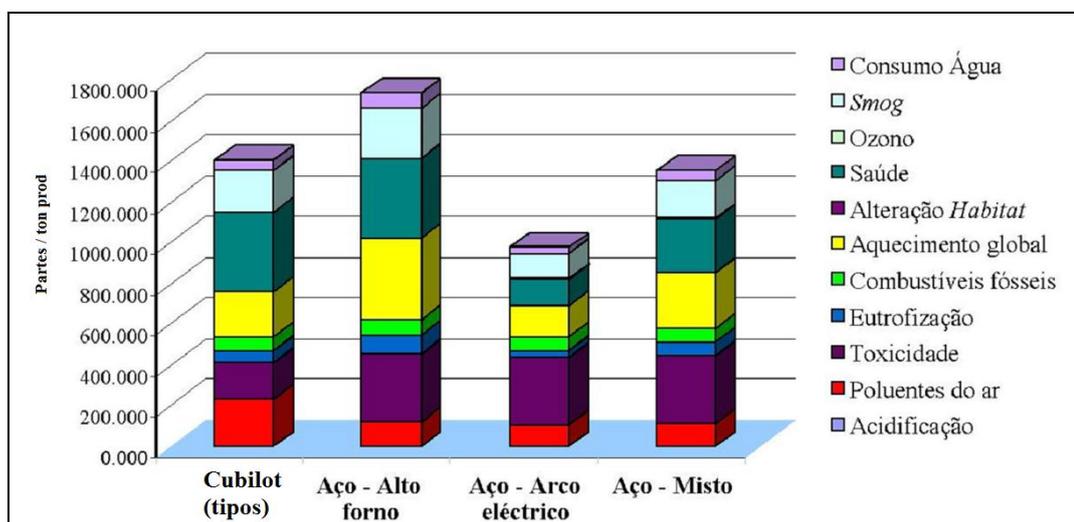
A figura 80 e 81 mostram respectivamente os impactos e a performance ambientais das rotas de produção de aço quando utiliza-se briquetes. Os dados foram obtidos do International Iron and Steel Institute. A avaliação de impactos foi efectuada com base na metodologia desenvolvida pela Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), desta análise resultaram onze índices (Gervásio,2006), os quais estão representados no gráfico da Figura 57.

**Figura 80** - Impactos ambientais do uso de briquetes correspondentes a usinas integradas e semi-integradas



Fonte: Gervásio (2006)

**Figura 81** - Resultado da performance ambiental de processos que utilizaram briquetes na carga



Fonte: Gervásio (2006)

### 3.8 - Impactos Econômicos do Uso de Briquetes

Em relação aos custos, a variação de preços do carvão mineral e do minério de ferro (duas matérias-primas ainda praticamente sem sucedâneos na produção de ferro primário pela rota integrada) obrigam as usinas a serem mais seletivas na composição da carga dos altos-fornos. A Tabela 24 mostra a economia com o uso de briquete como substituto de alguns materiais.

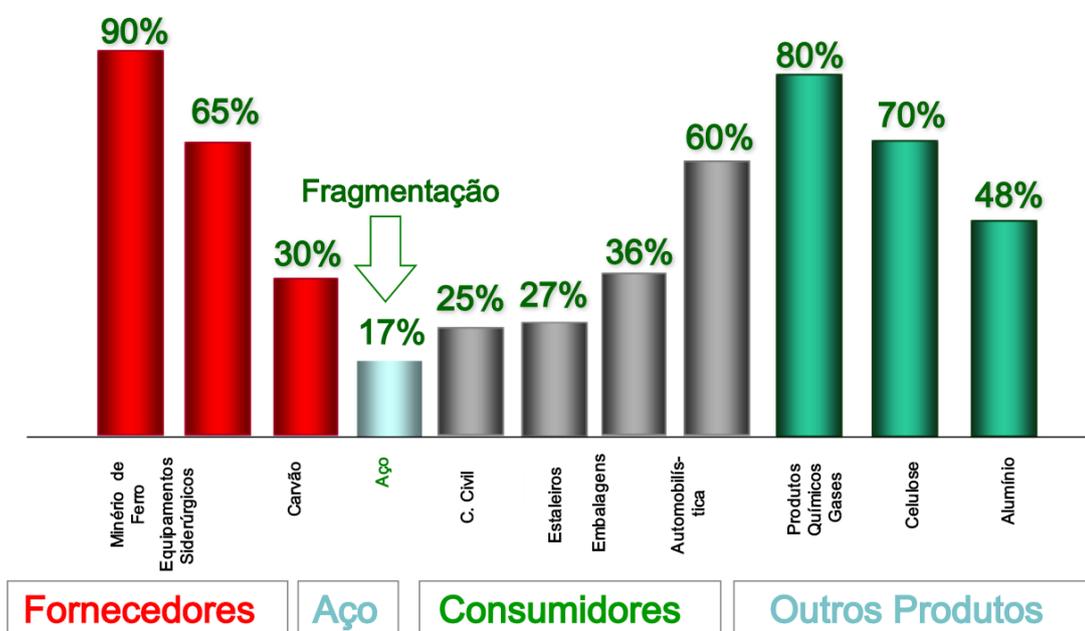
**Tabela 24** - Valor de equilíbrio em relação a matéria-prima substituída com o uso de briquetes.

| Instalação utilizada | Matéria-prima substituída | Valor de equilíbrio (US\$/t) |
|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Alto-forno           | Sínter                    | 45                           |
|                      | Pelota                    | 54                           |
|                      | Sucata                    | 60                           |
| Aciaaria convertedor | Sucata diversa            | 72                           |
| Refino secundário    | Sucata canivete           | 160                          |

Fonte : Andrade (1996)

A figura 82 mostra a participação da matéria prima na cadeia siderúrgica.

**Figura 82** – Participação da matéria prima na cadeia siderúrgica

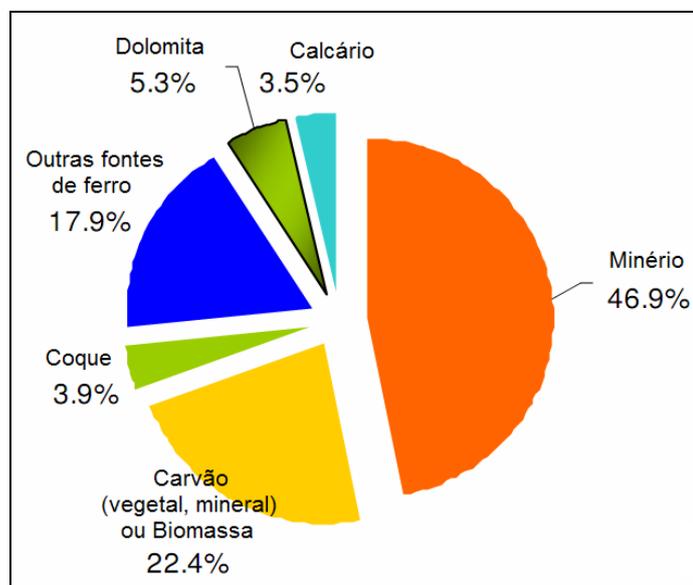


Fonte: Metal Bulletin

Fonte : Baptista (2013) rever

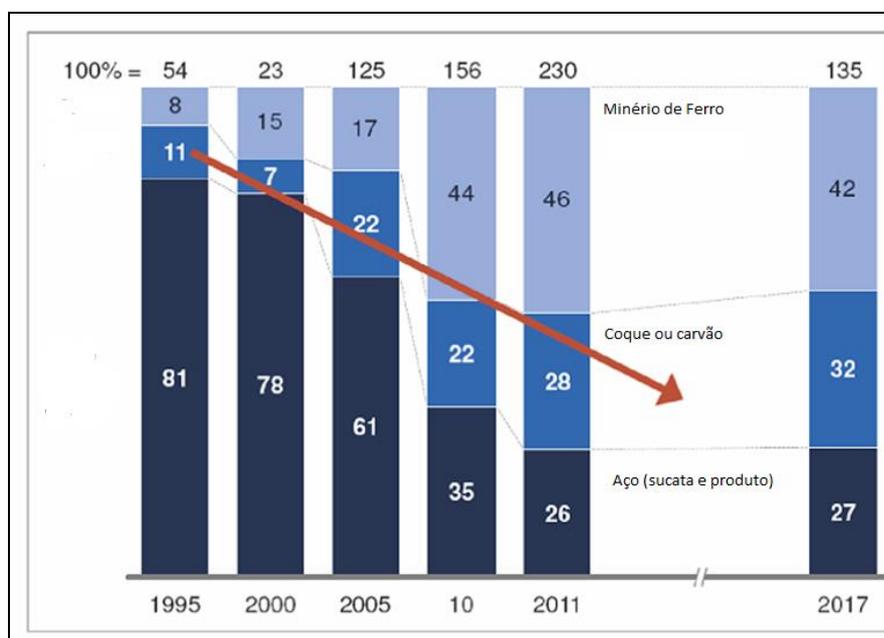
A figura 83 mostra a quantidade média consumida de matéria-prima para produção de ferro ou aço. Ao longo dos últimos anos vem ocorrendo uma brutal transferência de margens (dos custos) para as matérias primas, como visto na Figura 84.

**Figura 83** – Consumo de matéria prima para produção de ferro e aço



Fonte : Qizhou (2008)

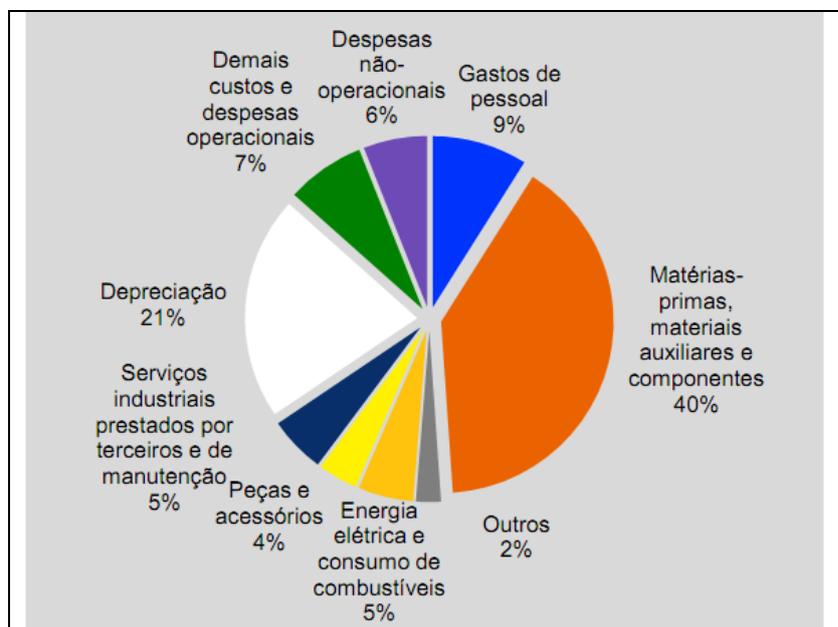
**Figura 84** – Transferência dos custos na produção do aço para a matéria prima



Fonte : Vieira (2013)

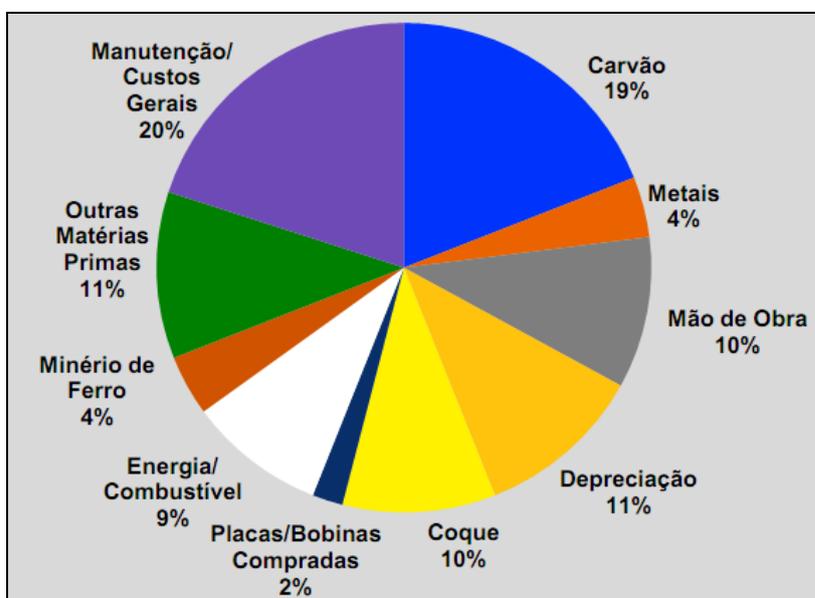
A Figura 85 resume a estrutura de custos na siderurgia como um todo e a Figura 86 nas usinas altamente integradas.

**Figura 85** - Estrutura de custos do setor siderúrgico em geral



Fonte: Baptista (2011)

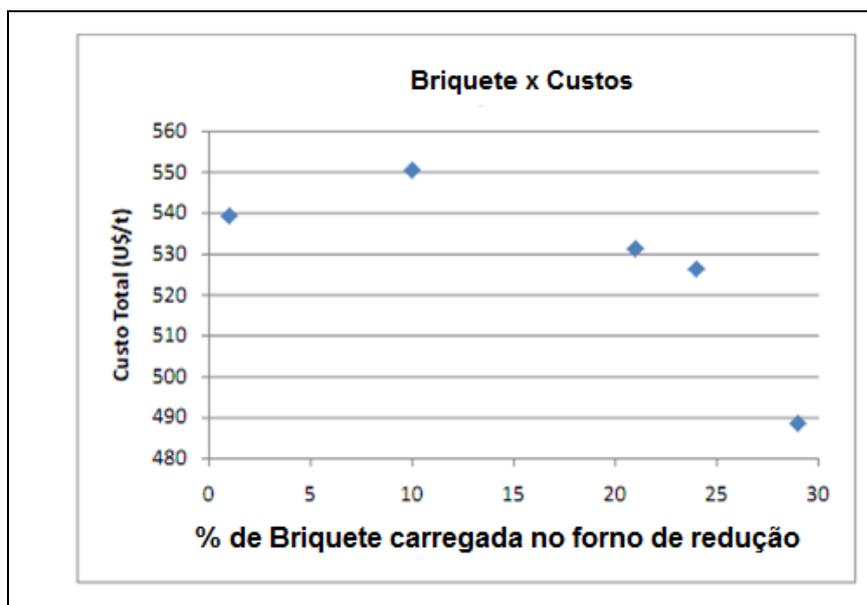
**Figura 86** - Exemplo de estrutura de custos de siderúrgica brasileira com mina própria



Fonte: Baptista (2013)

Na Figura 87 pode-se ver o impacto do uso do briquete nos custos finais de produtos de ferrosos.

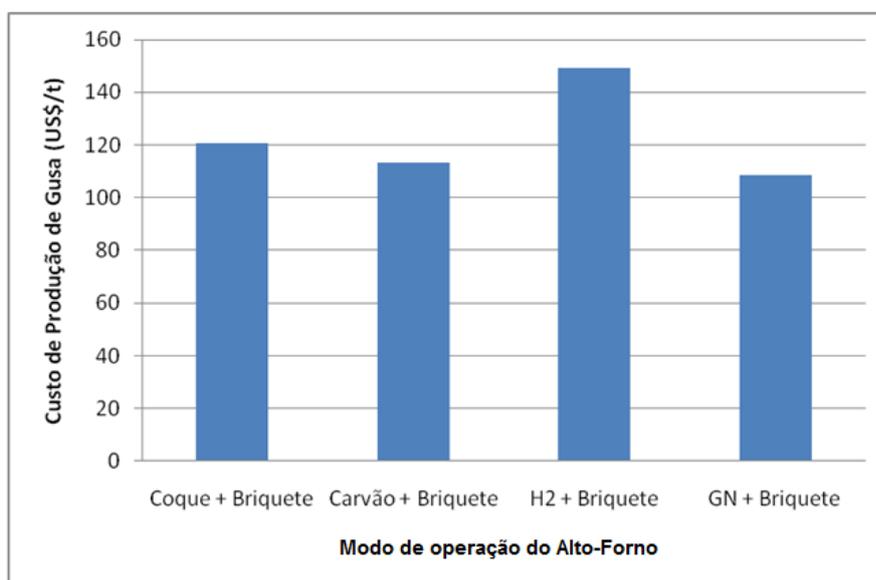
**Figura 87** – Comparativo da evolução do custo de produção do ferro versus o uso de briquetes na carga



Fonte: Qizhou (2008)

A figura 88 mostra os custos do gusa em alto forno que usa briquetes em sua carga.

**Figura 88** – Comparação dos custos de produção do gusa entre os altos-fornos a coque e a carvão vegetal quando se usa briquetes



Fonte: Baptista (2011)

A matéria prima ferrosa (sucata + gusa) usadas nas aciarias (Tabelas 25 e 26) representa mais de 50% do custo da aciaria e do valor do produto, como

mostrado nas Figuras : 89 e 90 e Tabela 27. Podendo ser este custo reduzido com uso de briquetes.

**Tabela 25** - Valores típicos de insumos de aciaria a oxigênio por tonelada de aço líquido.

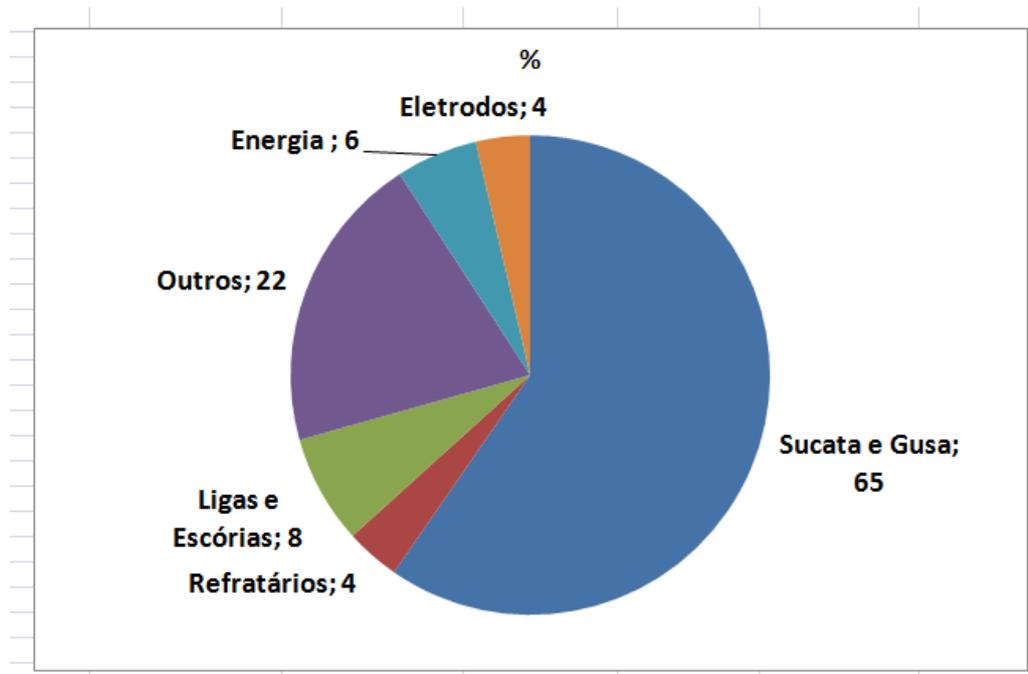
| Insumo           | Massa (Kg)  |
|------------------|-------------|
| Minério de Ferro | 7 – 20      |
| Gusa             | 820 – 980   |
| Sucata           | 170 – 255   |
| Coque            | 0,02 – 0,48 |
| Cal              | 30 – 55     |
| Dolomita         | 1,5 – 4,0   |
| Ferro - Ligas    | 3 - 9       |

Fonte: D'Ávila Filho, 2008

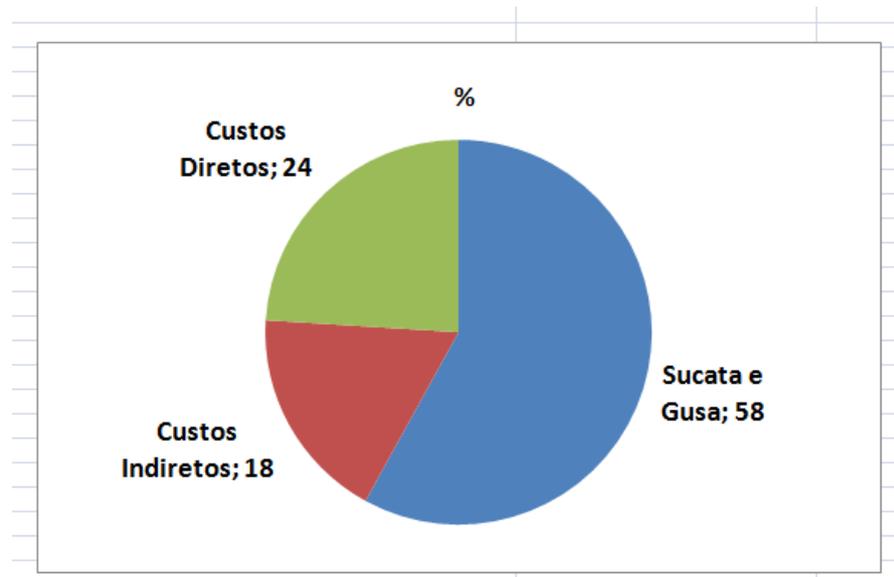
**Tabela 26** - Carga Metálica do Forno elétrico a arco (aciaria elétrica) (Kg/t de aço líquido)

| Carga Metálica | Europa | América do Norte | Japão | América Latina | Outros | Total Ocidente | Brasil |
|----------------|--------|------------------|-------|----------------|--------|----------------|--------|
| Retorno        | 229    | 286              | 130   | 166            | 175    | 191            | 130    |
| Comercial      | 753    | 651              | 847   | 413            | 700    | 707            | 615    |
| DRI            | 8      | 63               | -     | 437            | 183    | 98             | -      |
| Fe Gusa        | 39     | 32               | 62    | 43             | 28     | 43             | 330    |
| Gusa Liq       | -      | -                | -     | -              | -      | 2              | -      |
| Fe Ligas       | 58     | 21               | 31    | 25             | 15     | 33             | 25     |
| Total          | 1104   | 1086             | 1075  | 1129           | 1105   | 1087           | 1100   |

Fonte: D'Ávila Filho, 2008

**Figura 89** - Peso do gusa no custo da aciaria

Fonte: D'Ávila Filho, 2008

**Figura 90** - Impacto da carga metálica no custo final do produto

Fonte: D'Ávila Filho, 2008

A Tabela 27 mostra os custos que envolvem a fusão em forno elétrico a arco. Como pode ser visto, a carga metálica responde em média a cerca de 80% do custo do aço líquido obtido por FEA (Forno Elétrico a Arco).

**Tabela 27** custos percentuais de um FEA de 100 t de alta performance

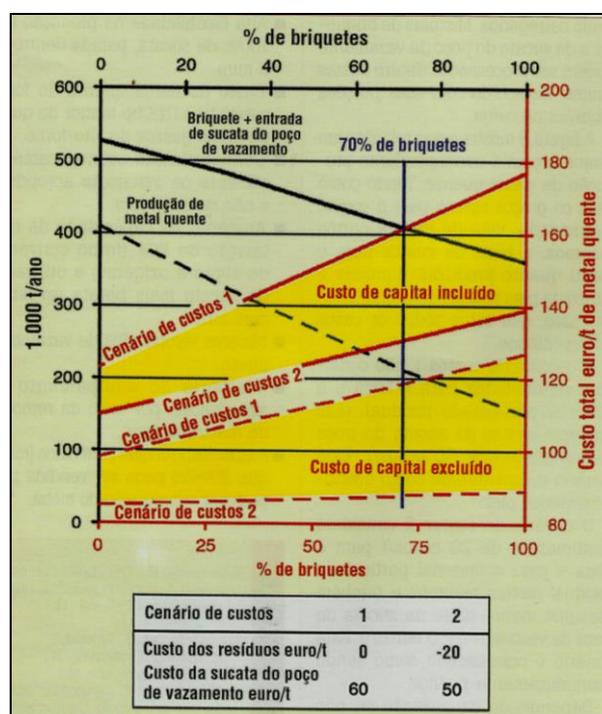
| #            | Item             | Custo %    | Faixa de variação |
|--------------|------------------|------------|-------------------|
| 1            | Carga Metálica   | 83         | 75 - 90           |
| 2            | Energia Elétrica | 04         | 03 - 06           |
| 3            | Eletrodos        | 01         | 01 - 03           |
|              | Mão de Obra      | 01         | 01 - 02           |
|              | Refratários      | 02         | 01 - 03           |
|              | Manutenção       | 02         | 01 - 04           |
|              | Combustíveis     | 01         | 0,50 – 1,50       |
|              | Oxigênio         | 01         | 0,50 – 2,50       |
|              | Outros           | 05         | 01 - 08           |
| <b>TOTAL</b> |                  | <b>100</b> |                   |

Fonte: Chevrand, 2008

Com a utilização de briquetes nos altos-fornos, tendo como resultado um gusa mais barato e de qualidade, pode-se reduzir nestes custos de 30 a 60%. Tanto da aciaria elétrica ou a oxigênio como no produto final.

Os custos de fabricação de metal líquido (ferro) no forno Oxycup, com o uso de briquetes estão mostrados na Figura 91. (Varnbüler, 2007)

**Figura 91** – Cenários de custos com a utilização de briquetes em fornos Oxycup.



Fonte: Varnbüler (2007)

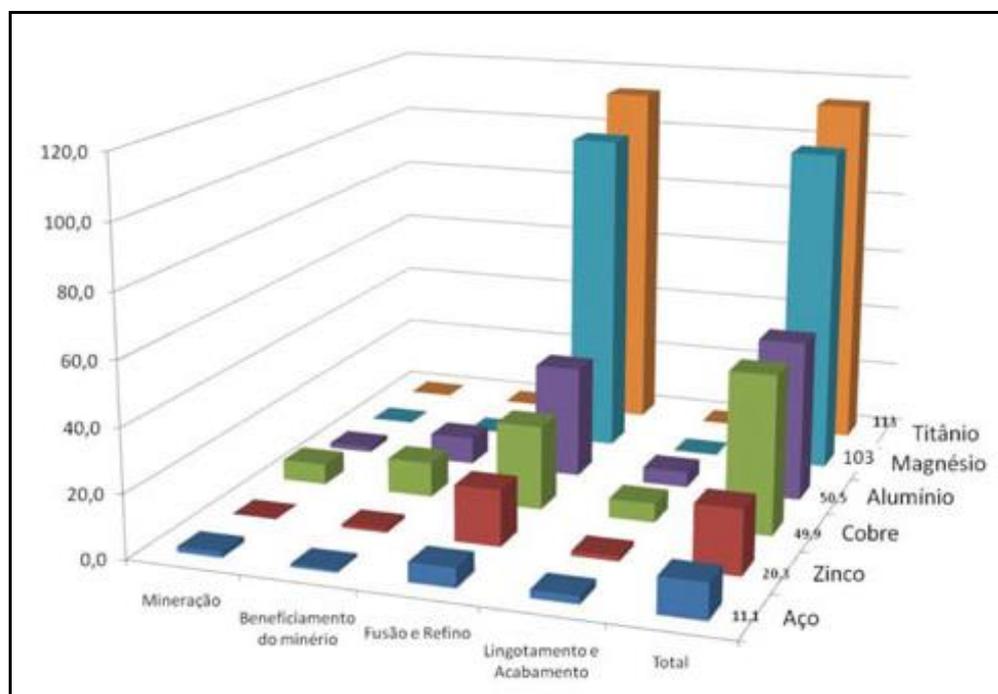
A figura 91 mostra a relação de custo da produção de metal quente, tendo como base os preços típicos para o combustível/redutor, eletricidade, mão-de-obra e outros insumos, a faixa de custo é mostrada para dois cenários limitantes de custo, que cobre todos os casos intermediários.

O cenário 1 não considera rendimentos para a lama e o material particulado residual, mas presume custos de sucata do poço de vazamento de 60 euros/t. Este cenário é considerado como economicamente desfavorável.

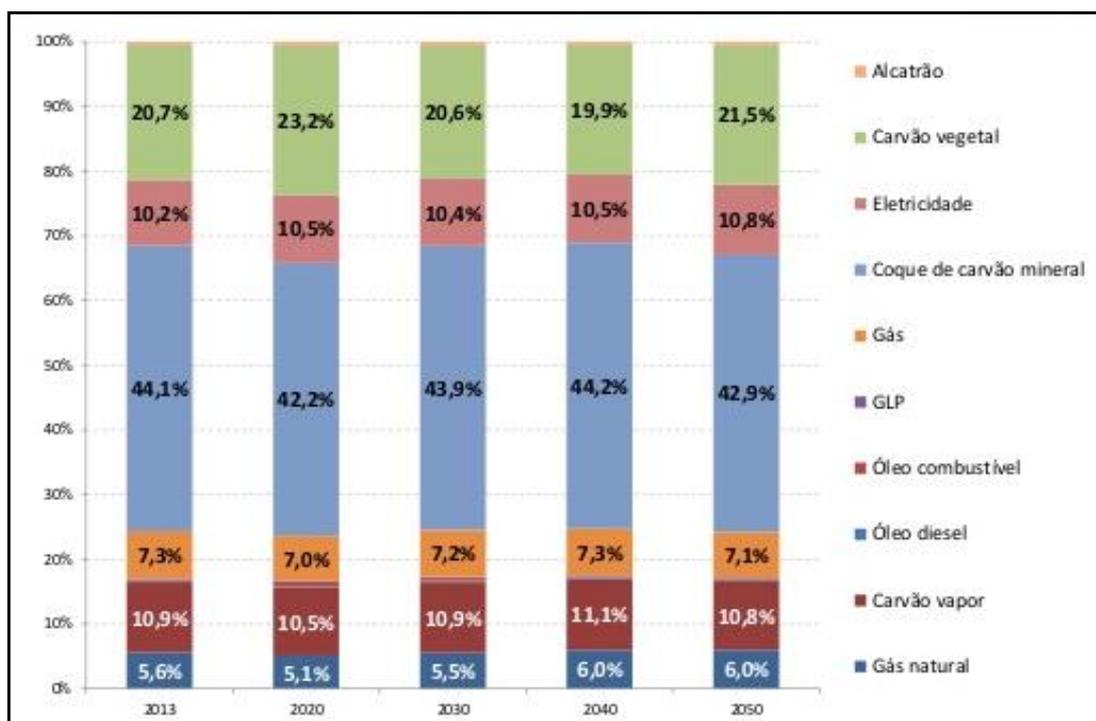
O cenário de custos 2 considera rendimentos de 20 euros/t para a lama e para o material particulado residual destes descartes e também presume custo da sucata do poço de vazamento (50 euros/t). Este cenário é considerado como sendo economicamente melhor.

Outra contribuição do uso de briquetes na redução dos custos, esta na economia de energia para produção do metal líquido. A Figura 92 mostra o consumo de energia na metalurgia e as Figuras 93, 94 e 95 no setor ferro e aço.

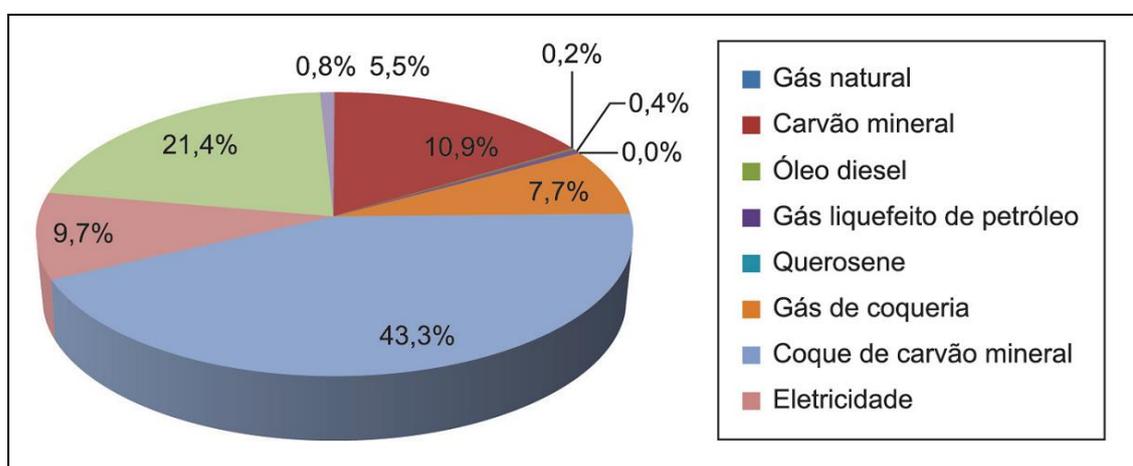
**Figura 92** – Consumo de energia na produção de vários metais



Fonte: Quintal (2010)

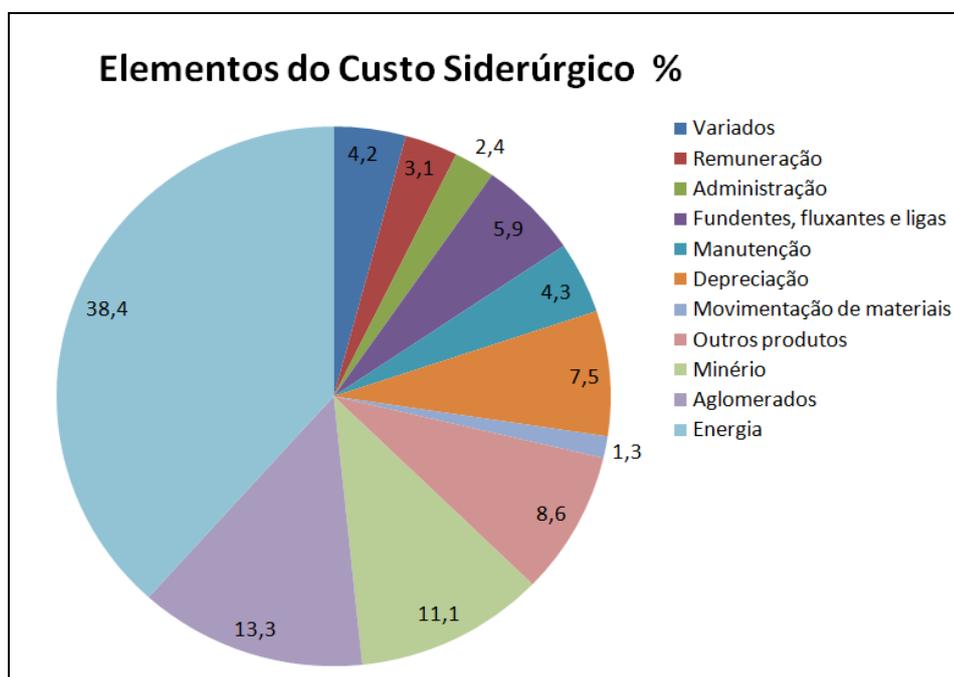
**Figura 93 - Consumo final energético – Ferro-gusa e Aço**

Fonte: Baptista (2013)

**Figura 94 - Consumo energético do setor ferro-gusa e aço (média histórica)**

Fonte: Caldas (2011)

**Figura 95** - Tipos de gastos na fabricação de produtos siderúrgicos tendo como destaque a energia elétrica



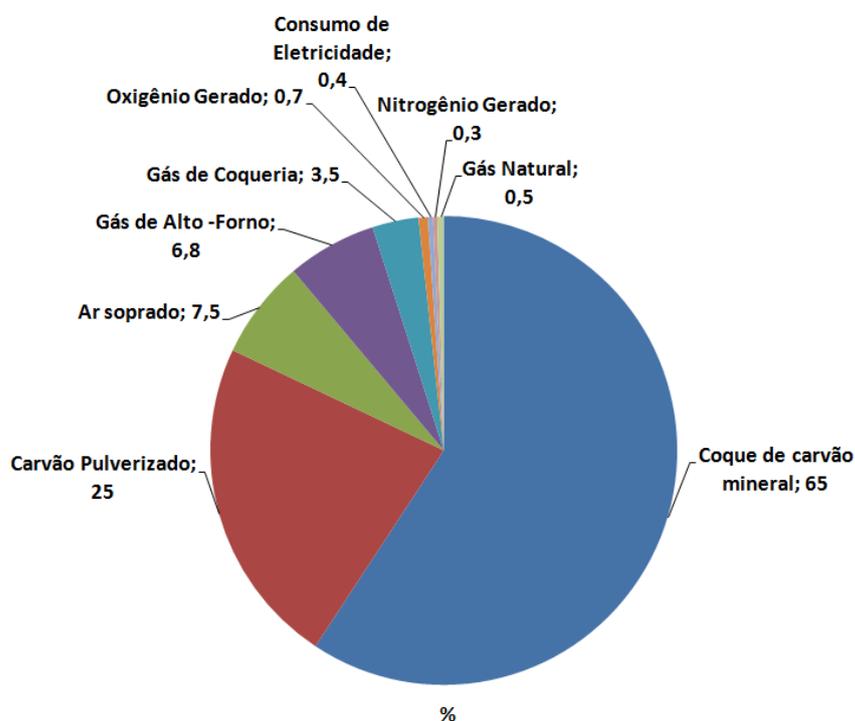
Fonte: Caldas (2011)

A energia necessária para o processo de redução e fusão do minério, sínter, pelotas e fundentes, nos altos-fornos é fornecida basicamente pela combustão de coque ou carvão. O processo do alto-forno é um dos principais consumidores de energia na indústria metalúrgica, como mostra a Figura 96. Na rota da produção de aço cru, o alto forno representa cerca de 70% da energia utilizada, além de cerca de 40% á 50% do custo total da produção de ferro gusa ser devido aos combustíveis, sobretudo de carvão mineral utilizado na fabricação do coque e crvão vegetal usado em menor escala, empregados na redução da carga neste forno. Portanto, qualquer pequena economia energética nas siderúrgicas integradas, representa considerável ganho no custo final do produto, fato este que justifica investimentos na busca de técnicas operacionais que minimizem os custos de produção. Assim, enormes esforços tem sido feitos com o objetivo de reduzir a taxa de combustível do alto forno, ou apenas substituir o consumo de termo-redutor por combustíveis menos nobres. (Castro, J. A., 2006).

O impacto do consumo de coque no custo de produção do ferro primário líquido (gusa) é significativo, em torno de 60% do custo total e deste modo qualquer esforço no sentido de redução de uso resulta em uma grande economia . Esta redução do custo de produção do ferro bruto através da diminuição do uso de combustíveis granulados naturais (coque ou carvão) no alto-forno é uma meta constante no processo.(Silva, 2006).

Além do custo, existem outros motivos para o uso de matérias primas alternativas menos nobres e recicladas com qualidade inferior ao coque e ao carvão, são eles: o processo de fabricação do coque é caro; além de ser nada saudável ao meio ambiente, devido à ocorrência de emissões de gases e particulados mostrando a alta capacidade poluidora da planta de produção de coque; somando a isso temos a escassez das fontes de carvão coqueificável. No caso do uso do carvão vegetal, no seu manuseio tem-se ainda muitas implicações ecológicas e sociais. (Baltazar,2005)

**Figura 96** - Consumo de energia em um alto-forno



Fonte: Lima, I. T. (2006)

O uso do briquete de biomassa, pela sua alta capacidade calorífica e sua fácil produção, é uma opção bastante considerável na troca de combustível fóssil, ou até mesmo de madeira ou cavaco, como fonte alternativa de energia para queima em alto-forno. ( Rocha, 2009)

As Tabelas 28 e 29 mostram a energia envolvida na extração de metais e na recuperação dos mesmos.

**Tabela 28** – Energia requerida para extração de alguns metais a partir se seu minério mais característico

| Metal    | Energia Requerida para a Extração a Partir do Minério (10 <sup>3</sup> kWh/ton) |         | Relação Industr./Teor. (Aprox.) |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------|
|          | Industrial                                                                      | Teórica |                                 |
| Magnésio | 359                                                                             | 4,8     | 75                              |
| Titânio  | 501                                                                             | 12,0    | 42                              |
| Cobre    | 54                                                                              | 1,6     | 34                              |
| Alumínio | 236                                                                             | 18,3    | 13                              |
| Ferro    | 22                                                                              | 3,7     | 6                               |

Fonte: Filho, 2010

**Tabela 29** – Energia específica requerida para a extração do metal em comparação com a sua recuperação por processamento de recicláveis (aglomerados)

| Metal    | Energia Requerida (10 <sup>3</sup> kWh/ton) |                  | Relação<br>Energia na Extração / Energia na Recuperação |
|----------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|
|          | Para Extração                               | Para Recuperação |                                                         |
| Titânio  | 126,0                                       | 52,4             | 2,4                                                     |
| Ferro    | 4,3                                         | 1,7              | 2,5                                                     |
| Cobre    | 14,0                                        | 1,8              | 7,87                                                    |
| Alumínio | 52,0                                        | 2,0              | 26,0                                                    |
| Magnésio | 91,0                                        | 1,9              | 47,9                                                    |

Fonte: Filho, 2010

A Tabela 30 mostra o ganho de energia com o uso conjunto de aglomerados (sinter, pelotas e briquetes) na carga de fornos de redução.

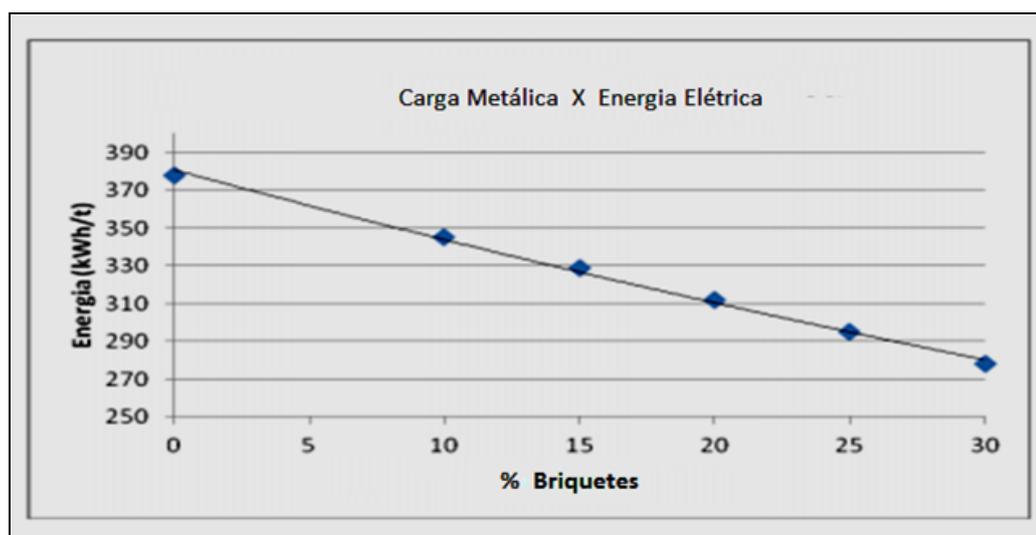
**Tabela 30** - Redução do consumo de energia obtida em função do uso de recicláveis sólidos na carga de fornos de produção de ferro primário (alto-forno e outros fornos), para um rendimento metálico de 90%.

| % de Aglomerados Reciclados na Carga | Redução no Consumo de Energia Kwh/t |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 20                                   | 72                                  |
| 25                                   | 86                                  |
| 30                                   | 97                                  |
| 35                                   | 115                                 |
| 40                                   | 130                                 |
| 45                                   | 140                                 |
| 50                                   | 151                                 |

Fonte: Madas, 2015

A Figura 97 mostra a redução do consumo de energia quando da utilização somente de briquetes na carga dos fornos de redução

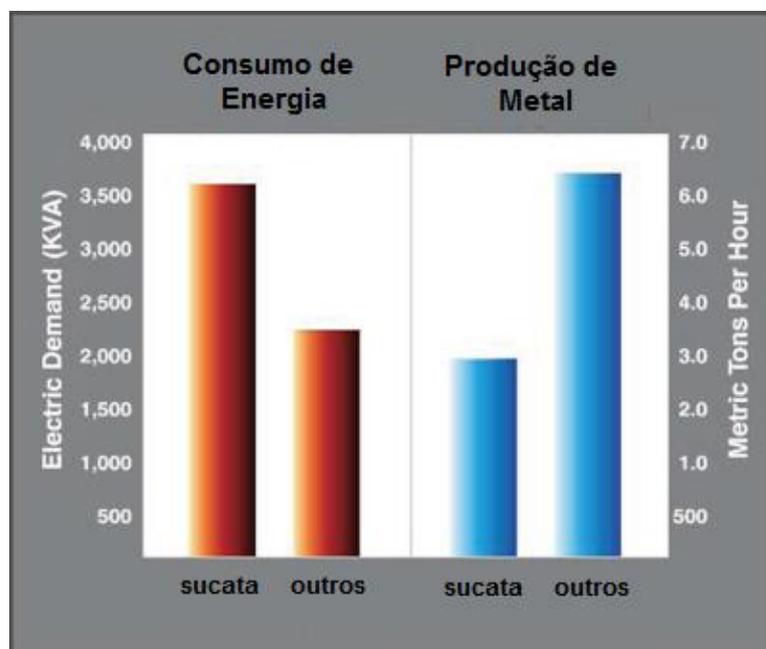
**Figura 97** - Redução do consumo de energia X quantidade de matéria prima



Fonte: Madas (2015)

As Figura 98 mostra a redução do consumo de energia com o uso de briquetes em comparação a sucata, quando se deseja aumentar o grau de metalização nos fornos de redução.

**Figura 98** – Consumo de energia X produção de metal líquido  
(com sucata e com briquetes e gusa)



Fonte : Baptista (2009)

A Tabela 31 compara o custo de produção de produtos fundidos em diferentes fornos com o emprego de briquetes.

**Tabela 31** - Custo de operação com o uso de briquetes

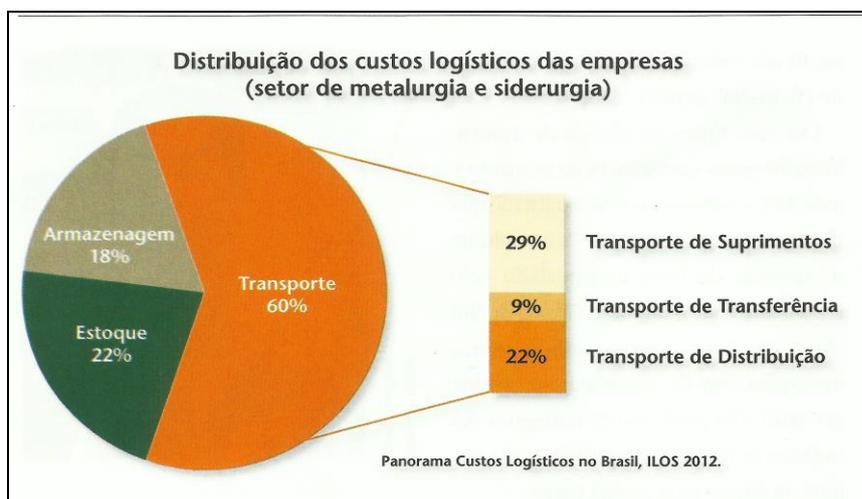
| Item           | Oxycup ou Cubilot<br>(USD/t) | Forno Elétrico à Indução<br>(USD/t) |
|----------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Metálicos      | 135,4                        | 151,7                               |
| Aditivos       | 9,3                          | 13,0                                |
| Vazamento      | 23,4                         | 29,6                                |
| Mão de Obra    | 4,0                          | 4,5                                 |
| Refratários    | 1,8                          | 3,1                                 |
| Waste disposal | 1,5                          | 0,5                                 |
| Manutenção     | 6,4                          | 4,4                                 |
| Infraestrutura | 10,0                         | 10,0                                |
| Total          | 191,8                        | 216,8                               |

Fonte: Madias, 2010

### 3.8.1 - Custos Logísticos

O custo total logístico é a soma dos custos de transporte, estoque, processamento de pedido e pleno atendimento ao cliente. (Baptista, 2013) A figura 99 mostra esta configuração.

**Figura 99 - Custos Logísticos**



Fonte: Baptista (2013)

A composição do custo logístico de uma matéria-prima corresponde à somatório dos custo de transporte, do custo de armazenagem e do custo de manutenção do passivo. O custo logístico total será o resultado da somatória dos três itens. E esses componentes detalhados são:

1- **Manutenção de estoque:** os custos de manutenção de estoque incorporam também as despesas de armazenamento, tais como: altos volumes, demasiados controles, enormes espaços físicos, sistemas de armazenagem e movimentação e pessoal alocado. Temos também custos associados aos impostos e aos seguros. O custo total anual para manutenção de estoque é calculado pela Equação 27.

$$CTA = B \times \left( \frac{C}{Q} \right) \quad \text{Equação 27}$$

onde B = custos gerais (outros), C = consumo anual e Q = quantidade estocada.

2- **Custo de armazenagem:** traduz-se no custo financeiro de todas as despesas para podermos manter todos os materiais na empresa e dos custos e recursos necessários para administrá-los. Em suma, é o custo do dinheiro envolvido nesse sistema, é um capital parado. O custo de armazenagem por lote anual (CA) é calculado pela Equação 28.

$$CA = \left(\frac{Q}{2}\right) \times P \times T \times i \quad \text{Equação 28}$$

Onde: Q = quantidade em estoque, P = preço unitário (lote), T = período de tempo de estocagem e i = taxa de juros ou custo do dinheiro no período.

O custo de armazenagem geral (CAG) é calculado pela Equação 29.

$$CAG = \left\{ \left[ \left(\frac{Q}{2}\right) \times P \right] + Df \right\} \times T \times i \quad \text{Equação 29}$$

Onde: DF- representa as despesas financeiras relativas a material auxiliar, manutenção de peças e equipamentos, edificações inclusive aluguéis e seguros, impostos, mão-de-obra empregada, etc... São as despesas gerais do sistema

O custo de destinação dos resíduos para aterros cresce a cada dia e a quantidade de prestadores deste serviço diminui.

E a tendência é piorar, porque não existem aterros industriais sendo construídos e as estradas estão cada vez piores e ou cada vez mais caras.

Ou seja, o envio para aterros industriais é a pior solução possível, porque ao custo de disposição tem-se de somar o custo ambiental e financeiro do frete e o risco de misturar com outros resíduos o que contaminam o que poderiam ser reutilizados no futuro.

Além do fato que não há concorrência neste tipo de prestação de serviços, o que faz as empresas reféns normalmente de um fornecedor que decide o preço.

Uma vez que você tenha determinado que seu resíduo seja passível de uso, faça uma avaliação das quantidades de material reutilizável que ficam rotineiramente disponíveis e seus custos atuais de processamento e de disposição do material, tais como taxas de disposição em aterros sanitários, custos de manuseio no local, fretes e outras despesas de gestão de resíduos, tais como pessoal e aluguel de caminhões.

Quando se constrói um projeto para a disposição em aterro sanitário ou um programa de reuso com beneficiamento pode-se calcular as economias em potencial de acordo com as relações mostradas abaixo:

- Reuso com Beneficiamento = (Custos dos Investimentos de Capital Amortizado + Custos Operacionais + Custos Administrativos / Regulatórios) – (Vendas de Subprodutos + Custos Evitados com Matérias- Primas + Custos de Disposição Evitados + Benefícios de Redução de Impostos Amortizados)

- Custo Atual = Valor Atual do Equipamento Amortizado + Custos Operacionais Atuais + Custos de Disposição Atuais + Custos Administrativos / Regulatórios Atuais +/- Taxa do Ativo do Equipamento Atual ou Depreciação

Os custos podem ser calculados com base por tonelada ou por unidade de volume. Se o custo do reuso com beneficiamento não for menor ou igual do que o custo presente por no mínimo entre 15 e 20%, as chances de um programa de reuso com beneficiamento serem bem sucedidas são muito remotas.

**3- Custo de transporte:** é o mais importante de todos, que envolve os custos com as despesas com fretes, todas as despesas relacionadas á movimentação de materiais dentro e fora da empresa, depreciação dos veículos, pneus, combustível, peças, custo de oportunidade dos veículos, manutenção, seguro, multas, impostos, etc...Calcula-se o custo do transporte (CT) pela Equação 30.

$$CT = CTt \cdot D \qquad \text{Equação 30}$$

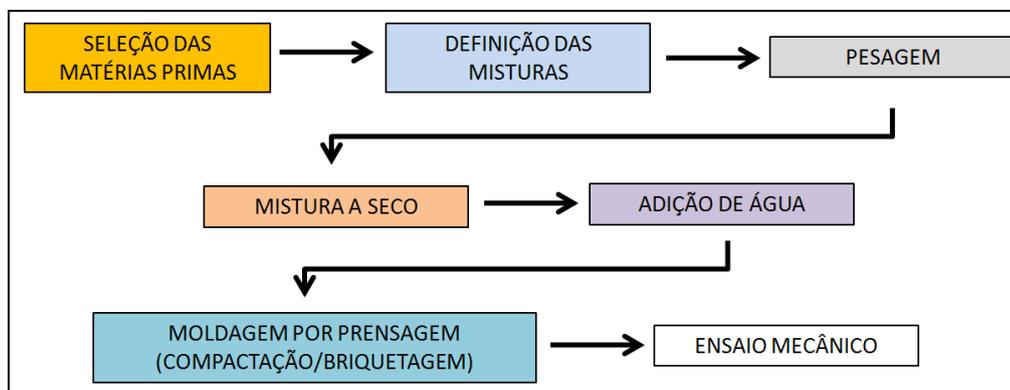
Onde: CTt = custo de transporte por tonelada por Km; e D = distância em Km

O uso de briquete reduz os custos logísticos em 50 à 70% mínimo.

#### 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender os objetivos propostos, a produção do produto sugerido seguiu-se as seguintes etapas mostradas no fluxograma da Figura 100:

**Figura 100** - Etapas para confecção do produto (aglomerado a frio tipo briquete)



As matérias primas selecionadas foram : carga metálica (minério de ferro e magães), fundentes (calcário, dolomita e cal), material combustível (coque e carvão vegetal), aglomerante (escória de aciaria LD), cujas composições estão mostradas nas Tabelas 32 a 37.

**Tabela 32** – Composição de Matéria prima dos Briquetes

| Matéria Prima | Teores (%) |                  |                                |       |       |       |
|---------------|------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|               | Fe         | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | Mn    |
| Dolomita      | 2,44       | 4,45             | -                              | 29,0  | 26,14 | 0,09  |
| Calcário      | 0,43       | 0,79             | -                              | 58,08 | 4,02  | -     |
| Manganês      | 33,23      | 10,60            | 1,70                           | -     | -     | 14,46 |
| Cal           |            | 0,82             |                                | 62,50 | 0,55  |       |

**Tabela 33** - Composição da escória MRPL

| % Compostos |     |                                |                  |     |      |      |
|-------------|-----|--------------------------------|------------------|-----|------|------|
| CaO         | MgO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | MnO | Fe t | S    |
| 46,7        | 6,4 | 0,9                            | 13,3             | 7,4 | 17,6 | 0,08 |

**Tabela 34** – Composição de Escória de Aciaria Elétrica

| % Compostos |     |                  |                                |      |           |                               |
|-------------|-----|------------------|--------------------------------|------|-----------|-------------------------------|
| CaO         | MgO | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | S (total) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| 29,4        | 4,7 | 11,6             | 6,8                            | 13,9 | 0,25      | 0,66                          |

**Tabela 35** – Composição da carga de carbono

| Qualidade | Item                           | Unidade | Valor      |       |
|-----------|--------------------------------|---------|------------|-------|
|           |                                |         | C. Vegetal | Coque |
| Química   | Carbono Fixo                   | %       | 73         | 88    |
|           | Matérias voláteis              |         | 23         | 4     |
|           | Cinzas                         |         | 2,5        | 11,5  |
|           | Enxofre                        |         | 0,042      | 0,78  |
|           | SiO <sub>2</sub>               |         | 6,2        | 51,3  |
|           | CaO                            |         | 38,3       | 4,6   |
|           | MgO                            |         | 6,4        | 4,5   |
|           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         | 7,8        | 27,9  |
|           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         | 8,6        | 6,6   |
|           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |         | 7,7        | 0,67  |
|           | K <sub>2</sub> O               |         | 17,8       | 3,6   |
|           | Na <sub>2</sub> O              |         | 2,6        | 2,8   |

**Tabela 36** - Composição química e perda por calcinação (PPC) das amostras de minério de ferro.

| <b>Elemento e/ou composto</b>  | <b>Jangada</b> | <b>João Pereira</b> | <b>Fábrica Nova</b> | <b>Serra Serpentina</b> |
|--------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| Fe                             | 40,08          | 33,94               | 31,45               | 34,66                   |
| SiO <sub>2</sub>               | 42,18          | 50,65               | 52,35               | 49,04                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,25           | 0,46                | 0,63                | 0,93                    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,016          | 0,033               | 0,023               | 0,036                   |
| CaO                            | 0,022          | 0,023               | 0,020               | 0,023                   |
| MgO                            | 0,003          | 0,091               | 0,039               | 0,085                   |
| Mn                             | 0,020          | 0,030               | 0,162               | 0,04                    |
| P                              | 0,014          | 0,027               | 0,034               | 0,017                   |
| PPC                            | 0,17           | 0,22                | 1,88                | 0,59                    |

**Tabela 37** - Composição química da Bentonita em %

| <b>Fe t</b> | <b>SiO<sub>2</sub></b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>CaO</b> | <b>MgO</b> | <b>S</b> |
|-------------|------------------------|------------------------------------|------------|------------|----------|
| 2,15        | 60,4                   | 15,65                              | 1,78       | 3,56       | 0,025    |

As misturas para a confecção dos briquetes cilíndricos (Tabela 38), foram executadas em misturador de pás de bancada, tipo Core Sand Mixer Type PKM da George Fischer Limited (Figura 101), com tempo fixo de 10 minutos. Os materiais eram misturados a seco primeiramente em seguida adicionava-se a água em partes, deixando a mistura homogeneizar-se antes.

**Tabela 38** – Composição em peso das misturas briquetadas

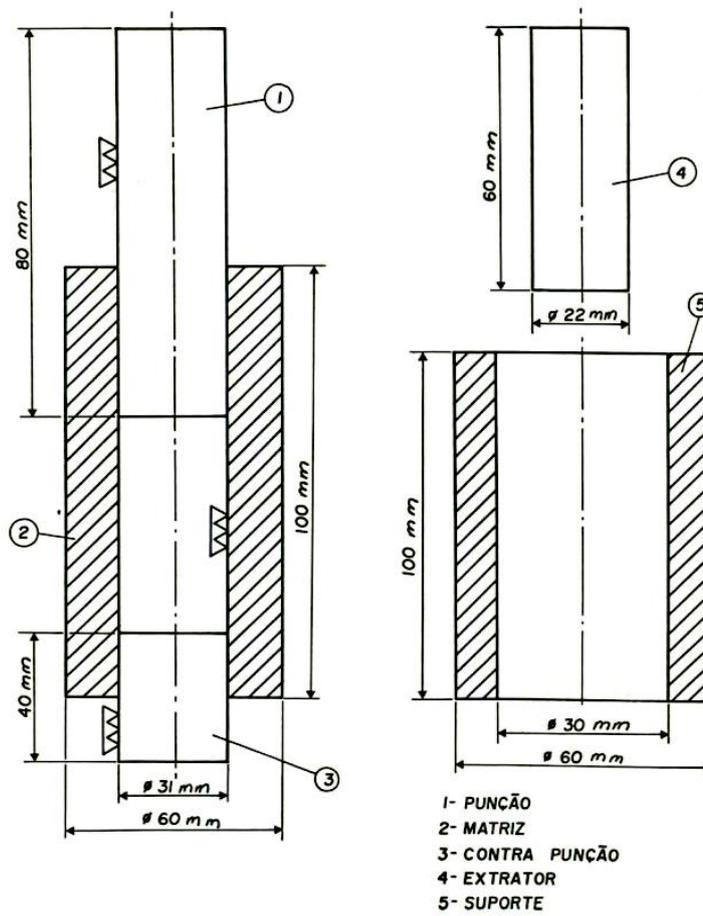
| Matérias primas (Briquetes) |   | % em peso    |                        |           |          |          |     |       |                |      |
|-----------------------------|---|--------------|------------------------|-----------|----------|----------|-----|-------|----------------|------|
|                             |   | Escoria MRPL | Escoria Forno Elétrico | Bentonita | Calcário | Dolomita | Cal | Coque | Carvão Vegetal | Água |
| Testes preliminares         | 1 | -            | -                      | 5         | 1        | 1        | 0,6 | 10    | 10             | 10   |
|                             | 2 | -            | 10                     | -         | -        | -        |     |       |                |      |
|                             | 3 | -            | -                      | -         | 10       | 10       |     |       |                |      |
| Briquete Multiconstituído   |   | 5            | -                      | -         | 5        | 5        |     |       |                |      |

**Figura 101** – Misturador de bancada

O conjunto (ou molde) briquetador, está detalhado na Figura 102 e mostrado na Figura 103. A briquetagem foi feita a frio em prensa tipo macaco hidráulico de acionamento manual, (Figura 104), com força de 10 ton e tempo de prensa fixo em 3

minutos. O briquete produzido (Figura 105) possui uma dimensão de 30 mm de diâmetro e 30 mm de altura.

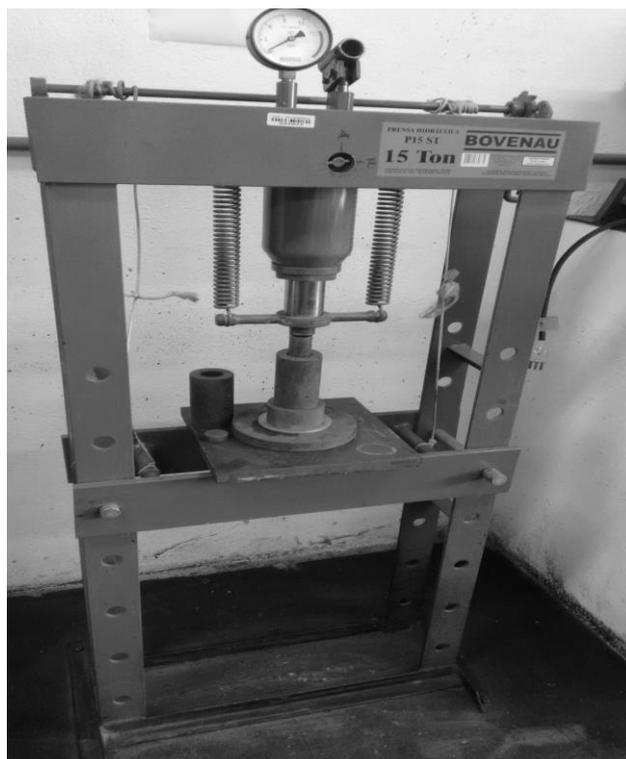
**Figura 102** – Desenho do molde de briquetagem



**Figura 103** – Molde de briquetagem



**Figura 104** - Sistema de briquetagem (prensa + molde)



**Figura 105** - Briquetes produzidos nesta dissertação (o produto)



Os ensaios foram conduzidos de acordo com ABNT 12654 e ISO 17025.

A seleção de materiais e amostragem foi de acordo com a ABNT 10007.

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ABNT 7680, 5738 e 13729

O ensaio de compressão diametral foi executado de acordo com a norma ASTM C496 e ABNT 7222, em máquina de compressão modelo Emic PC – 150C.

Foram executados inicialmente teste preliminares com as misturas com escoria de aciaria elétrica, calcário + dolomita e bentonita, como aglomerantes e a cal hidratada como aditivo para todas as combinações mostradas na Tabela 32, com o objetivo de determinar o tempo de mistura, % de água ótima e tempo de prensa. A base foi 1000g de carga metálica, composta de 50% de mistura de minério de ferro de 4 minas diferentes (500g) e 50% de minério de mangânes (500g).

Avaliou-se a resistência mecânica através do ensaio de compressão diametral dos briquetes e também mediu-se a força de fratura para outras matérias primas utilizadas nos fornos siderúrgicos, como carvão, coque, sinter, calcário, pelota e minério de ferro.

Foram executados 10 ensaios para cada mistura briquetada e 5 ensaios para cada matéria prima, para obter um valor médio.

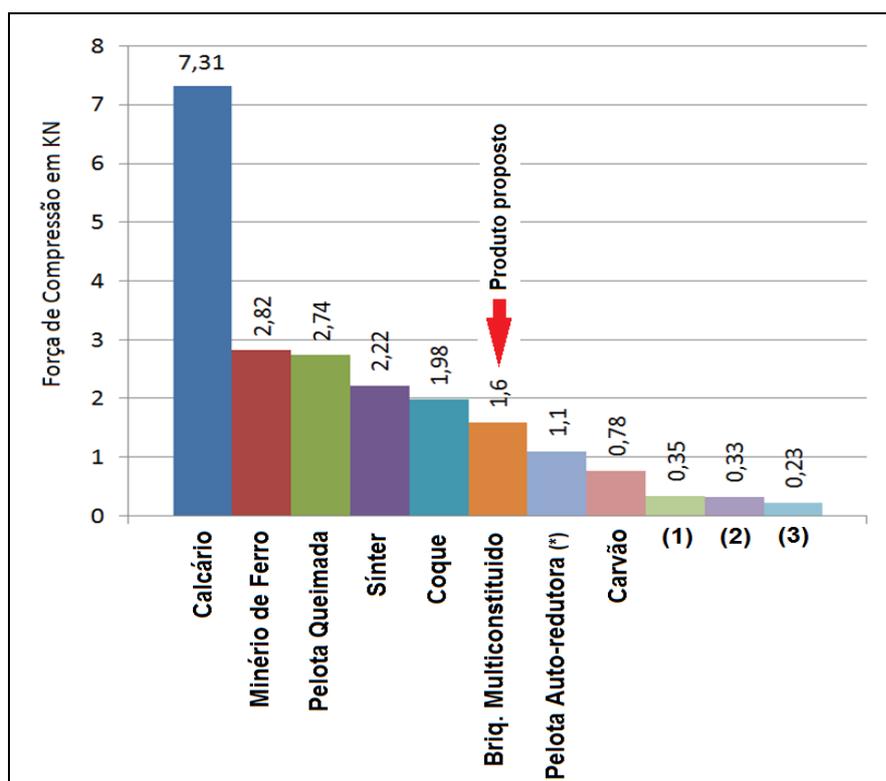
Foram feitas macrofotografias, com câmera manual, dos briquetes fraturados,

As fotomicrografias da face interna, fraturada dos matérias foram feitas em microscópio eletrônico de varredura - MEV , com aumentos de 100 até 1500 vezes.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das forças de compressão até a fratura dos briquetes e das matérias primas estão mostrados e comparados no Figura 106. Tais ensaios foram realizados visando apenas vislumbrar uma ordem de grandeza, sem atentar para valores padronizados.

**Figura 106** - Resultado dos testes de compressão simples nas matérias primas e nos briquetes



(1) Briquete Teste Preliminar  
(Bentonita + Cal + Cálcarío + Dolomita + Coque + Carvão)

(2) Briquete Teste Preliminar  
(Escória de FEA + Cal + Coque + Carvão)

(3) Briquete Teste Preliminar (Calcário + Dolomita + Cal)

(\*) estufada aglomerada com bentonita ou cimento e cal como aditivo

A mistura proposta resistiu a carga até valores próximos ao do coque e sinter, as outras misturas apresentaram valores próximos ao do briquete com bentonita. O que sugere mais opções como aglomerantes para briquetes utilizados em condições que não sejam tão severas como as apresentadas em um alto-forno.

Os valores de compressão diametral foram analisados conforme indica a literatura (Meyers e Meyers, 1981 e 1983 ; León, 1985, Chagas, 2012) e estão apresentados na Tabela 39 e Tabela 40, os valores de comparação do carvão, coque, pelota, briquete tipo-C, briquete de manganês e outros briquetes foram extraídos da literatura, e constam da Tabela 12.

**Tabela 39** – Valores do ensaio de resistência à compressão diametral

| Métodos                                                  |                                  |          |         |                       |                     |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|----------|---------|-----------------------|---------------------|
| Briquetes<br>(Misturas)                                  | Normas<br>ASTM C496<br>ABNT 7222 | ISO 4700 | Wakeman | Kapur e<br>Fuerstenau | Cahn e<br>Kerpinski |
|                                                          | MPa                              |          |         |                       |                     |
| (Calcário + dolomita + cal)                              | 16,4                             | 32,8     | 24,64   | 54,45                 | 25,5                |
| (Escória de FEA + Cal + Carvão + Coque)                  | 23,5                             | 47       | 35,4    | 66,5                  | 36,6                |
| (Bentonita + Cal + calcário + dolomita + carvão + coque) | 25,1                             | 50,2     | 37,4    | 50,5                  | 38,8                |
| Multiconstituído                                         | 114,3                            | 228,6    | 171,3   | 262,89                | 177,7               |

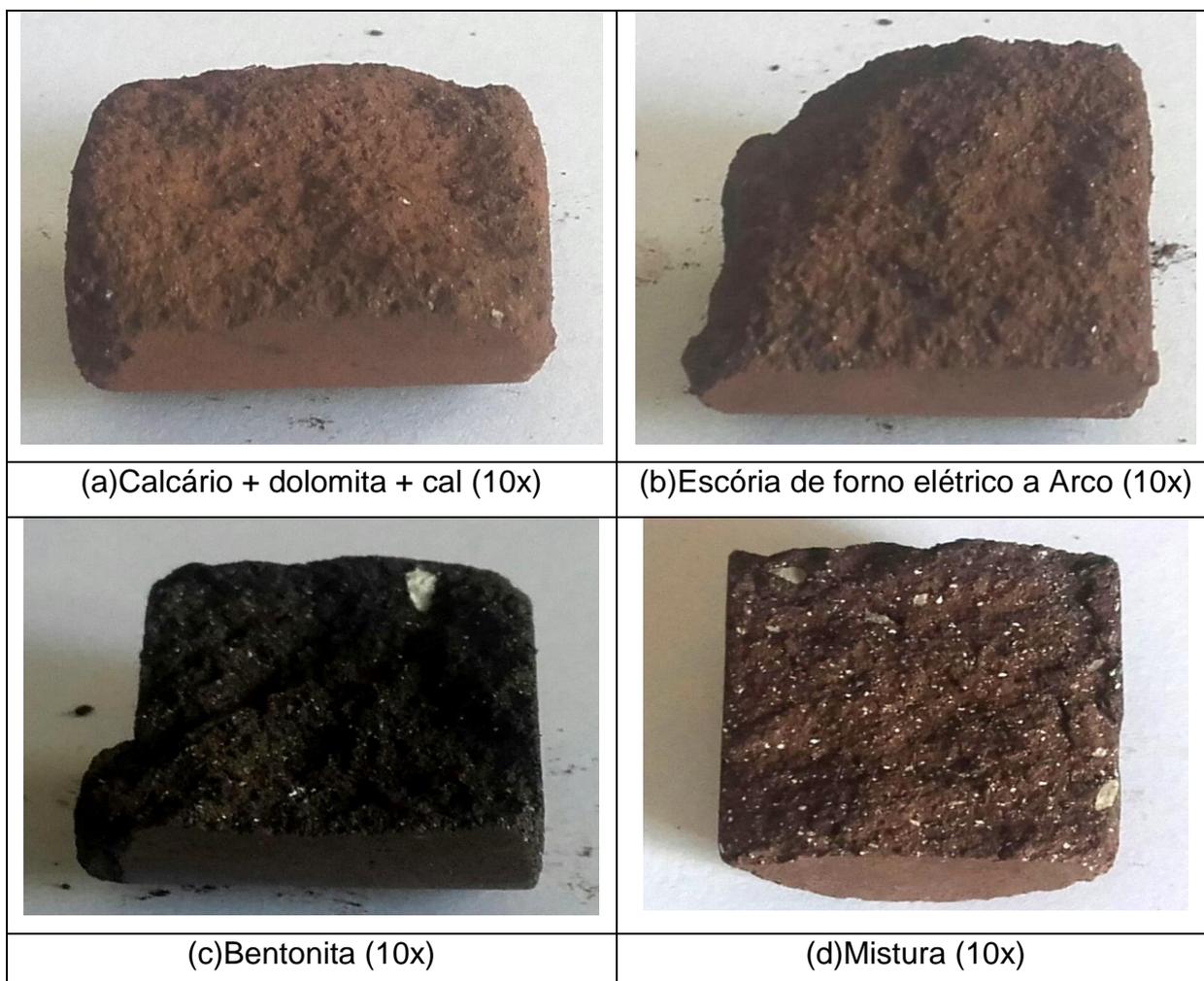
A Tabela 40 mostra a média destes valores, que podem ser comparados com os valores encontrados na literatura, conforme a Tabela 12.

**Tabela 40** – Média dos valores da compressão diametral

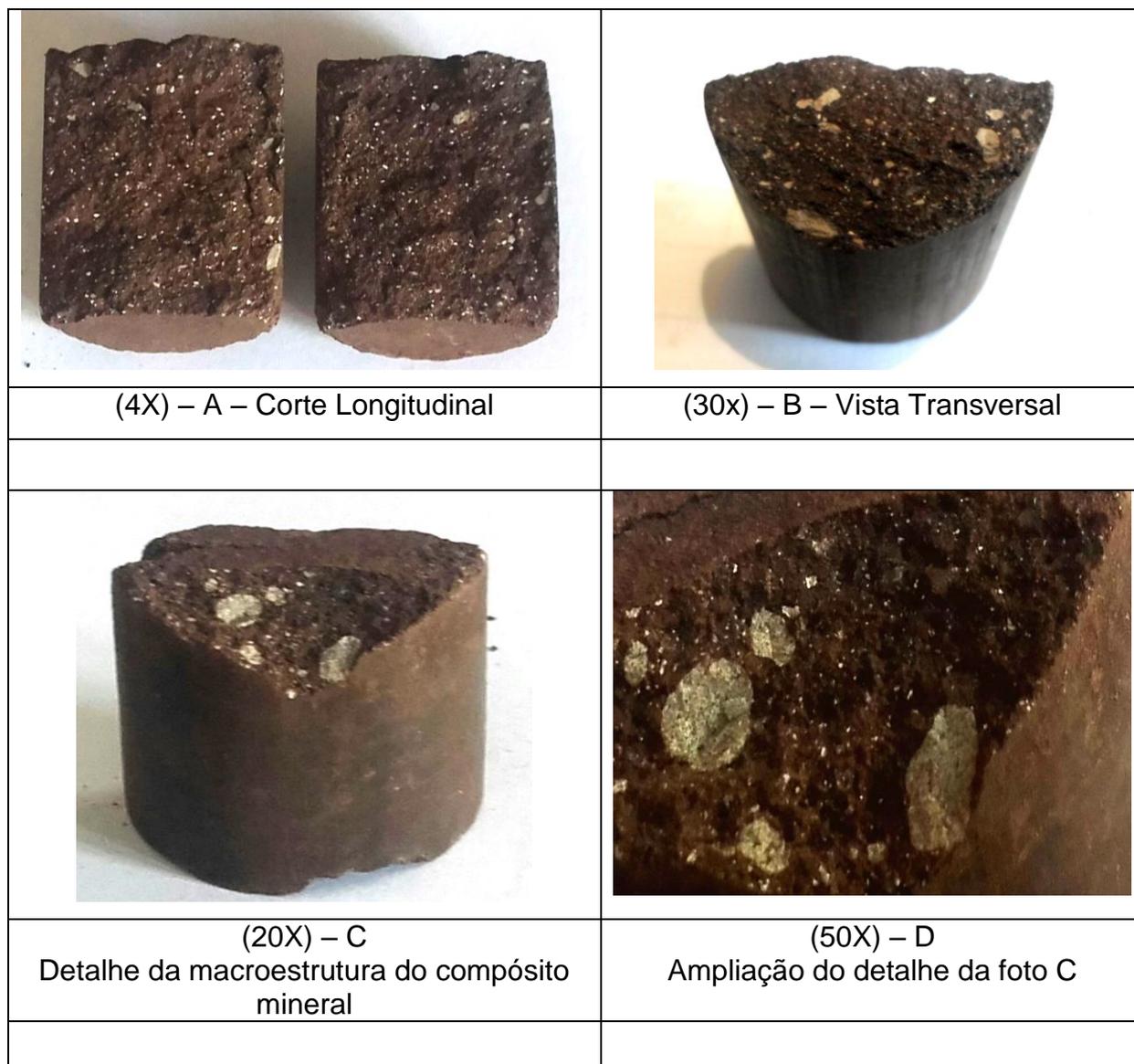
| Matéria Prima                                                                        | Resistência à Compressão (MPa) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Briquete Minério de Fe e Mn (Bentonita + Calcário + Dolomita + Cal + Carvão e Coque) | 37,95                          |
| Briquete Minério de Fe e Mn (Escória de FEA + Cal + Carvão e Coque)                  | 40,5                           |
| Briquete Minério de Fe e Mn (Calcário + Dolomita + Cal)                              | 30,25                          |
| <b>Briquete Multiconstituído</b>                                                     | <b>190,95</b>                  |

As microfotografias das fraturas estão mostradas na Figura 107 (a) até (d) e Figura 108 (a) até (d) mostra detalhes da macroestrutura do briquete aglomerado com escória de aciaria que é produto desta dissertação.

**Figura 107** – Fotomicrografias das fraturas dos briquetes produzidos nesta pesquisa (após ensaio de compressão diametral)



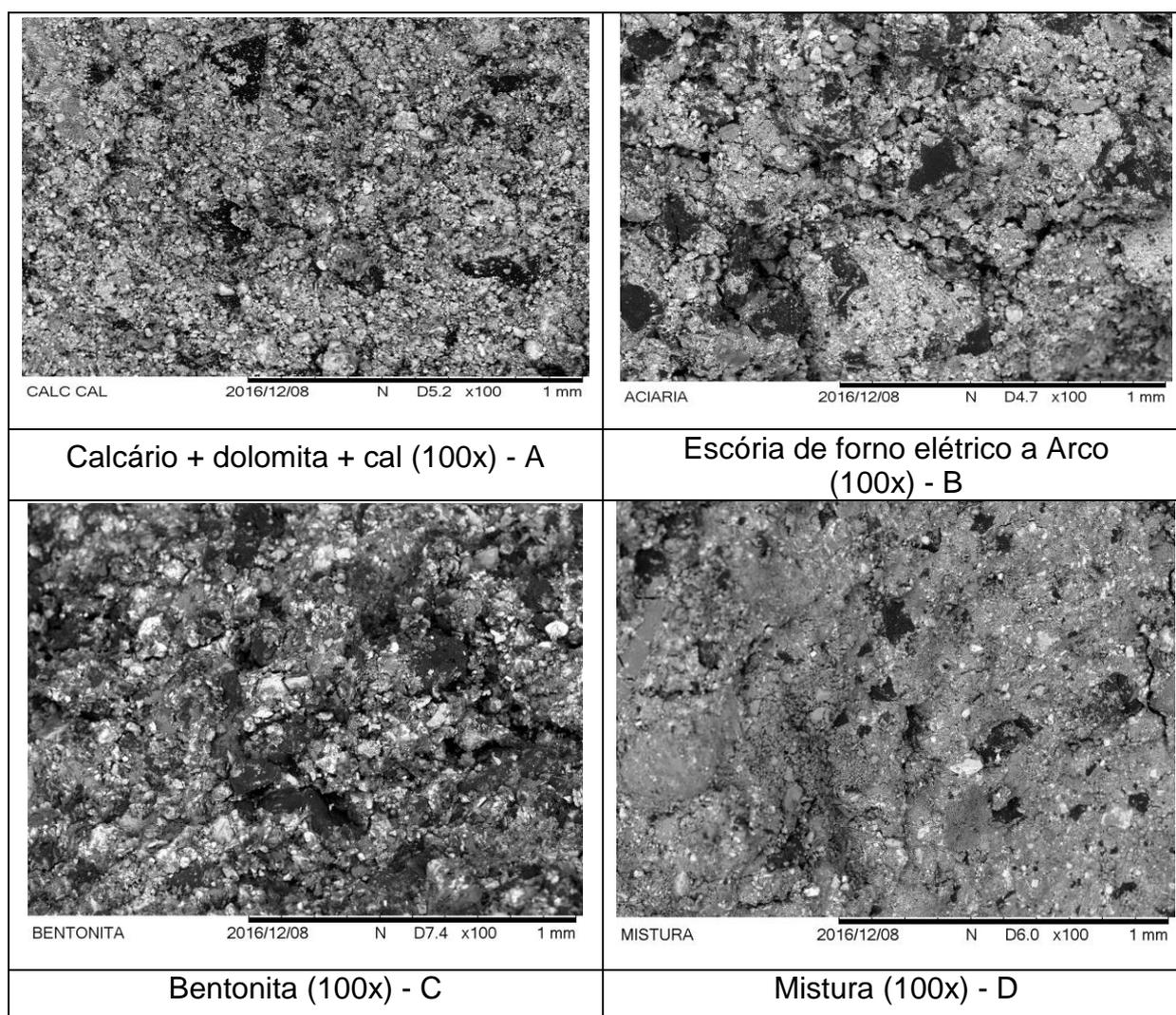
**Figura 108** – Fotomacrografias dos briquetes aglomerados com escória de aciaria (produto objetivo desta pesquisa)



Takashi (2008), explica esta formação macroestrutural de um compósito mineral (mineral industrial e/ou matéria-prima sintética) tipo briquete, como visto na Figura 108, comentando que, em um uma mistura de matérias-primas, quando se esta na presença de levados teores de álcalis solúveis como ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^+$ ) os mesmos aumentam a força iônica de meio umidecido e, a tendência à floculação no seio do bolo a aglomerar (precipitação de nódulos ou fases cimentantes) de macro ou micro partículas estabilizadas eletrostaticamente, que aceleram a pega hidráulica ou cimentícia do ligante. A floculação reduz a quantidade de água disponível para separar as partículas e, com isso, aumenta o empacotamento dos grãos e a

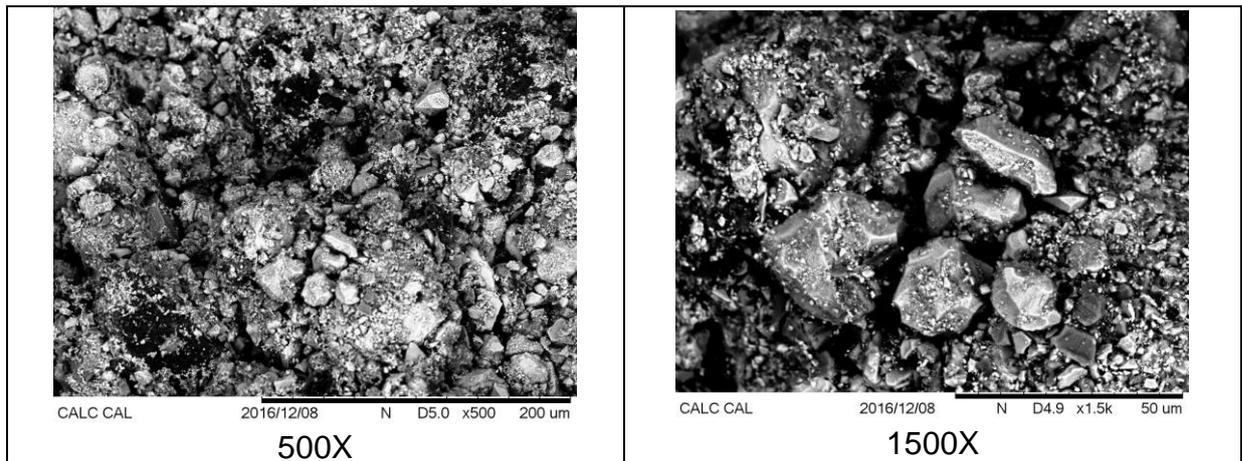
compactabilidade. Além disto a concentração dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}(\text{OH})_4$  hidratados se eleva, aumentando a taxa de precipitação dos hidratos. A reação de hidratação de ligantes cimentíticos (como a escória de aciaria) ocorreria da forma seguinte :  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3] \rightarrow \text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_2^{2+} + 2[\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2] \leftrightarrow$  fases hidratadas. Desta forma, quaisquer impureza (como o carbono presente principalmente) que elevem a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}(\text{OH})_4$  hidratados estarão contribuindo, segundo o princípio de Le Chatelier, para a formação de hidratos e, conseqüentemente de partículas insolúveis dispersas na matriz e de uma pega precoce do material (com propriedades cimentantes) usado como aglomerante ou ligante. Um maior teor de cálcio favorece a reação de hidratação descrita anteriormente. Estas partículas de dimensões sub-micro, micro e macro, de grãos arredondados ou aciculares, posicionadas de modo topograficamente e geograficamente coerentes com a matriz, fortificam a ligação da massa do aglomerado, resultando em uma elevada resistência mecânica do sólido (produto). Coelho (2005) e colaboradores mostram que o uso de escórias melhoram as características da mistura que são adicionadas. Em Polissení (2010) também se encontra a afirmação dos efeitos benéficos (em termos de melhora de características, sejam quais for) de materiais finos dispersos (como escórias) em misturas minerais.

As fotomicrografias em MEV dos briquetes estão organizadas nas Figuras 109 até 113.

**Figura 109** - Fotomicrografia de MEV das fraturas dos briquetes, aumento de 100x

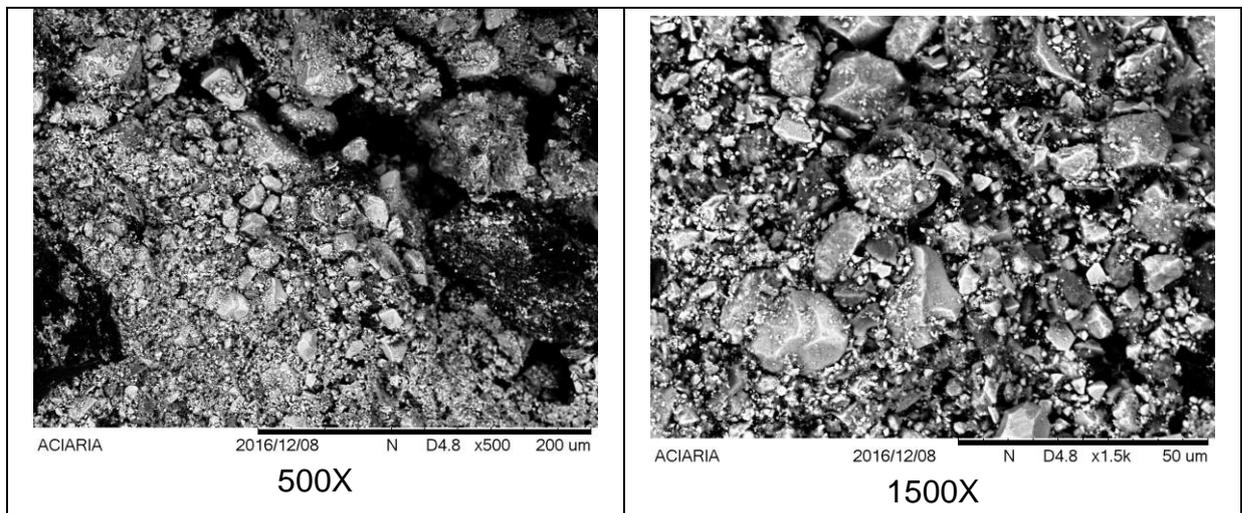
Observando a Figura 109 em 100X de ampliação, as superfícies fraturadas dos briquetes, pode-se visualizar um aspecto mais pulverulento da mistura com Calcário + dolomita + cal, (Figura A) que resulta em menor resistência. O aspecto da superfície das misturas que emprega como ligante principal escoria de aciaria elétrica (Figura B) e bentonita (Figura C) são bem próximos, como foram também próximos os valores de força de compressão. sugerindo que a escoria de aciaria elétrica poderia ser usada como substituto da bentonita quando se fabricado briquetes para uso em forno elétricos, painelas e carros-torpedo. A micrografia da superfície da fratura do briquete multiconstituído (Figura D) desenvolvido nesta pesquisa, se apresenta muito compacta, com a dispersão da fase cimentante, levando a apresentar o valor de força de compressão próximo ao coque.

**Figura 110 - Micrografia do briquete com calcário + dolomita + cal**



Nas fotomicrografias da figura 110 observa-se um material muito desagregado, que não garante resistência mecânica.

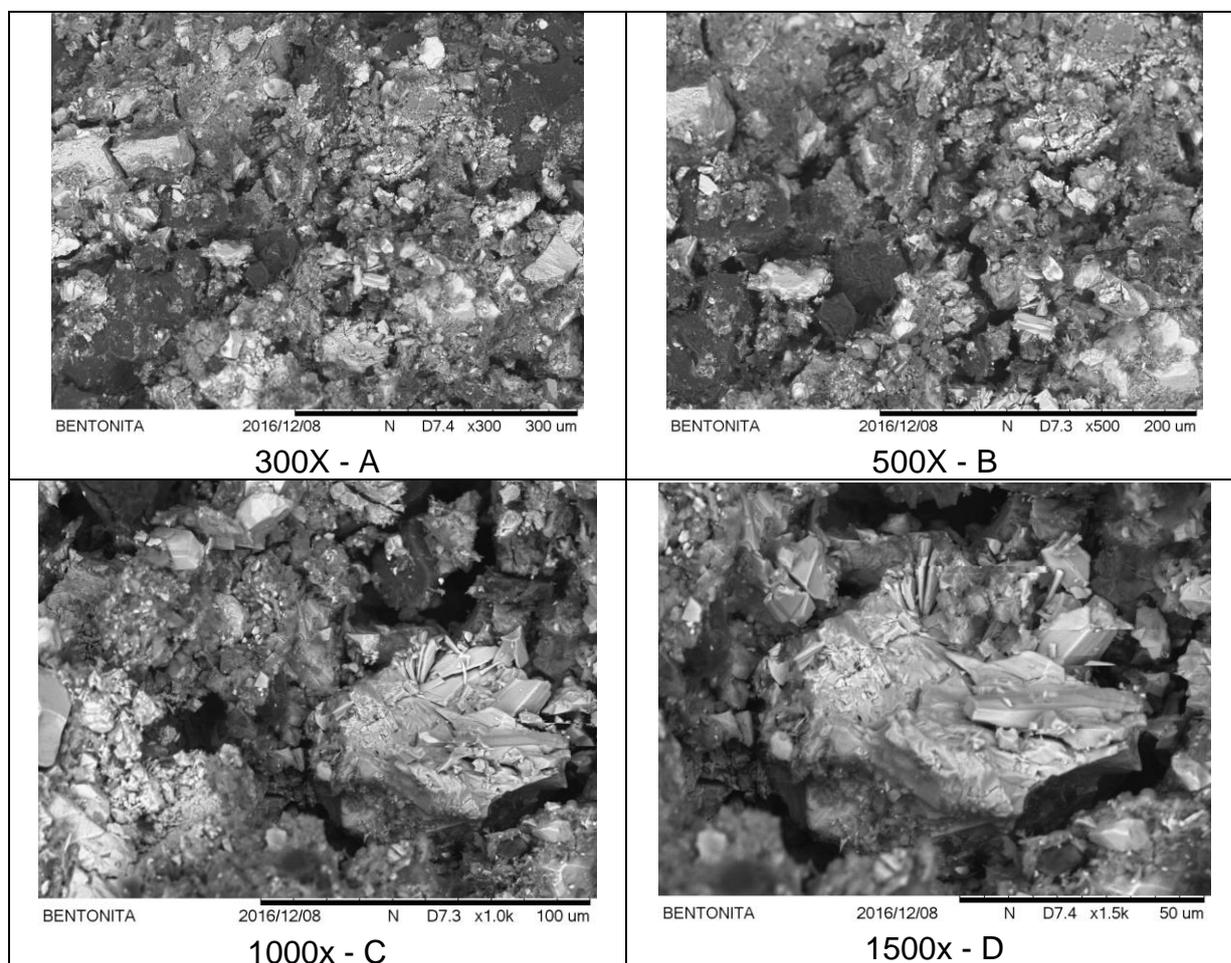
**Figura 111 - Fotomicrografia de MEV do briquete aglomerado com escória de aciaria elétrica**



Nas micrografias vistas na figura 111 do material aglomerado com escória de aciaria elétrica, nota-se também um material com pouca compactação, este fenômeno é comentado por Ahmed (2014), onde atribui o mesmo a presença de

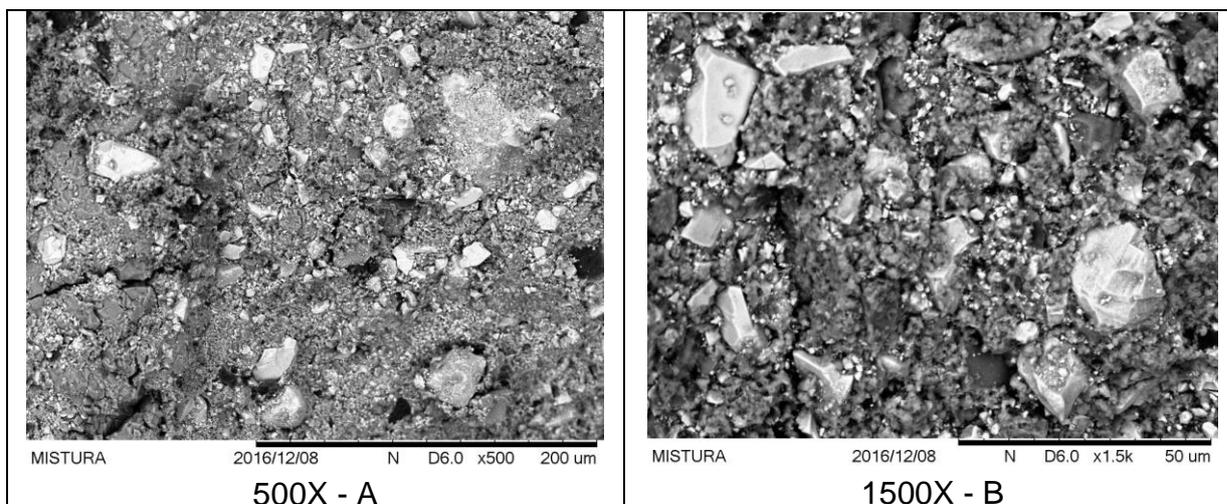
elementos de liga e residuais, em baixos teores, que interferem totalmente no poder ligante da escória.

**Figura 112** - Micrografias do aspecto da fratura do briquete aglomerado com bentonita



Na figura 112 A e B nota-se que o material exibe compactação porém existe muitos vazios, característicos da aglomeração com bentonita (Takashi, 2008). E nas micrografias C e D mostra-se a formação de colônias de grão de bentonita que é um grande problema na indústria de aglomerados a frio, conforme cita Pietsch (2002), resultando em menor resistência do material.

**Figura 113** - Fotomicrografia de MEV do briquete multiconstituído desenvolvido nesta dissertação



Observa-se na micrografia A da figura 113 o material com alta compactação e com a fase cimentante dispersa no material. Na micrografia B pode-se ver que a fase dispersa possui formas e tamanhos variados, esta configuração garante a resistência alcançada no material, conforme descreve Takashi (2008).

O valor médio de resistência alcançado, 191 MPa no briquete multiconstituído (coque máximo 180 MPa) pode ser fruto: **(i)** da compactação mecânica (prensagem); **(ii)** do fenômeno denominado poder de aglomeração a frio (p. a. f.); **(iii)** do fenômeno denominado sensibilidade a compactação; **(vi)** do efeito cimentício da escória; **(v)** do fenômeno efeito Filler; **(vi)** da distribuição granulométrica natural das matérias primas que eleva a compactabilidade; **(vii)** do teor ótimo de água de adição; **(viii)** da relação água/cal, **(ix)** da interação sinérgica entre os materiais da mistura (regra das misturas clássica) e **(x)** da adição de materiais pozzolânicos finamente moídos.

O briquete apesar de um produto simples é considerado uma matéria-prima com sistema complexo, devido as suas características mecânicas não estarem ligadas somente a força de compressão mas também e com grande influência a resposta interna da mistura a interação de seus componentes.

Para formar aglomerados a frio, ligações devem ser estabelecidas entre as partículas (pó), de tal forma que essas ligações forneçam uma adesão,

suficientemente forte, para prevenir a “quebra” ou o rompimento dos grânulos nas operações subseqüentes do processo industrial, deste modo conforme Silva (2013), existem cinco mecanismos de ligações entre os grãos de matérias primas minerais. Forças de adesão e coesão, no filme líquido imóvel, entre as partículas individuais primárias, forças interfaciais, no filme líquido móvel, dentro dos grânulos, formação de pontes sólidas após a evaporação de líquidos. Forças de atração entre as partículas sólidas. (Forças físicas, tais como as forças de Van der Waals, magnéticas ou eletrostáticas), Entrelaçamento mecânico entre partículas. E dois fatores mais importantes que agem na formação e nas características da massa aglomerada (briquetada): fatores dependentes das partículas, tais como área superficial, forma, estrutura cristalina e distribuição granulométrica; e forças capilares e tensões superficiais geradas pela adição de água ao processo e a ação de aglutinantes. As variáveis de processo que influenciam diretamente nestes fatores são: quantidade de água adicionada; tamanho e forma das partículas; e as forças executadas pelo tipo de equipamento utilizado.

Deste modo conforme a pesquisa de León (1985) o comportamento mecânico de um briquete é regido primeiramente, pelas forças naturais que atuam na formação de aglomerados sem a aplicação de forças externas, são as responsáveis e que primeiro permitem as ligações entre as partículas de matérias-primas, proporcionando resistência mecânica ao produto. Estas forças são do tipo físicas e aplicadas. As forças físicas envolvem as ligações sólidas (endurecimento de ligantes e cristalização); as interfaciais (pressão capilar) formam as interações sólido/líquido que geram as forças adesivas e coesivas que ocorrem na presença de ligantes viscosos (pastosos) a hidraulicidade; tem-se também a atração entre partículas sólidas (forças de Van der Waals, eletrostáticas e eletromagnéticas) que resultam nas forças de entrelaçamento de partículas de formas irregulares.

O segundo tipo de forças refere-se às forças aplicadas (a distribuição da energia de compressão na massa), ou seja, aos efeitos originados durante a ação do regime plástico, que propicia a aproximação das partículas individuais, onde as forças físicas começam a atuar, como diz León (1985) em seu trabalho.

Nos processos de aglomeração em que as partículas individuais estão completamente molhadas e/ou envolvidas por filmes pastosos (aglomerantes), as

principais forças físicas envolvidas provém do efeito capilar e da tensão superficial. A magnitude das forças capilares, que estão ligadas a característica cimentícia do aglomerante, que por sua vez é fruto da basicidade definido a hidraulicidade, dependem do tipo de ligação entre as partículas que podem ser pendular, funicular e capilar, como afirma Bernardes (2006) em seu artigo.

De acordo com o trabalho de Lemos (2015), a resistência alcançada do produto desenvolvido nesta pesquisa de mestrado, também pode ser atribuída aos três estágios ou tipos de deformações que ocorrem durante a compactação de pós em uma máquina de briquetagem: comportamento totalmente elástico; partícula deslizante; deformação irreversível da partícula. Os mecanismos para o desenvolvimento da resistência durante a compactação são gerados por dois fenômenos: (i) Deformação plástica; (ii) Deslizamento da partícula e travamento.

Interpretando as colocações de Lemos (2015) pode-se dizer que durante o estágio inicial de compressão há o rearranjo das partículas, de uma forma solta para um estágio empacotado. Conforme o aumento da pressão, a área de contato entre os grãos aumenta e as partículas são submetidas a deformações plásticas. Dependendo do material, a partícula pode deformar plasticamente e fraturar. A resistência do briquete está relacionada com a efetividade de contato entre as partículas, e a densidade do briquete, com a pressão de compactação. Deste modo, vários mecanismos podem estar envolvidos nos processos de densificação/compactação de pós: rearranjo e aumento de densidade, atrito, fragmentação e deformação plástica das partículas. No que tange ainda a resposta da mistura a pressão mecânica, podemos comentar que a deformação dos grãos ocorre através do movimento das partículas constituintes, pelos rolamentos e deslizamentos interpartículas. O deslizamento dos grãos pode ser comparado então com o deslizamento de dois blocos em atrito com interfaces irregulares. Na pesquisa deste autor, observou-se que as propriedades físicas, como o tamanho de partícula e forma, influenciam na deformação elastoplástica no estágio de compactação a frio. A pressão exercida nas partículas têm influência direta na densidade, porosidade e, conseqüentemente, na resistência mecânica. Com isto podemos crer que as propriedades dos sólidos que são importantes na briquetagem por compactação em prensa são: fluidez e coesividade; forças superficiais; aderência; dureza; distribuição

do tamanho de partículas. Lemos (2015) cita que a qualidade dos briquetes dependem de variáveis de processo, tais como: tipo de máquina de briquetagem, porcentagem de água, pressão de fabricação, quantidade e tipo de ligantes.

Conforme o estudo de Pimenta (1999) o desenvolvimento de resistência em aglomerados a frio, como o briquete produzido nesta dissertação, esta também atrelado ao “poder de aglomeração a frio” (p.a.f.), entende-se este fenômeno/característica, como a capacidade que matérias primas siderúrgicas na forma de finos, tem de formar micropelotas ou grânulos quando, providos de certa umidade, e submetidos a uma etapa de mistura. O mesmo fundamenta-se na hipótese de que os finos de matérias primas britadas e moídas, se tornariam aglomerantes, em função da energia eletrostática liberada pela quebra das moléculas nestes processos de beneficiamento. Muniz (1991) reforça esta idéia, que o “poder aglomerante” está diretamente ligado a granulometria, e que a micropelotização obtida na mistura é, ainda, auxiliada pelo uso de materiais aglomerantes, pela movimento dinâmico do processo de mistura e pela quantidade adequada de água adicionada para correção da umidade ótima de briquetagem.

Muniz (1991) em seu estudo, mostra que uma mistura de matérias-primas apresenta uma boa condição de aglomeração a frio, quando existe uma relação adequada entre a quantidade de partículas aderentes e partículas nucleantes, e relaciona o p.a.f. (poder de aglomeração a frio) com o “tamanho do grão cristalino”, onde a partícula pequena é policristalina, porosa, rugosa, o que contribui para a micropelotização da mistura e aumento da resistência a verde, a seco e a quente, sendo considerada nucleante. A partícula de tamanho médio é monocristalina, compacta, lisa e tem forma arredondada, e são aderentes, favorecem a resistência mecânica e a resistência sob redução do aglomerado. As partículas grosseiras, diminuem a resistência mecânica, devido ao fato de que a superfície específica das mesmas, não permite uma aglomeração suficientemente forte. As partículas ultra-finas tendem a preencher os vazios da carga, aumentando a resistência. Estas fundem mais rapidamente durante o processamento no interior dos fornos de redução, formando compostos resistentes e de boa redutibilidade, no aglomerado, elevando o seu desempenho como matéria prima.

Segundo D'Avila (2015), para que uma mistura apresente uma boa aglomeração a frio, outros fatores, talvez mais importantes, também devem ser considerados tais como: rugosidade, forma e porosidade das partículas e a natureza da ganga do minério de ferro. Ademais, os minérios podem conter diferentes constituintes mineralógicos acessórios, tais como quartzo, caulinita, gibbsita, etc., contendo, ainda, diferentes valores de porosidade e de diâmetro dos poros (micro, meso e macro), que têm forte influência nas etapas de aglomeração a frio e a quente de finos de minérios de ferro.

Takehara (2005) também afirma que as características internas dos minérios influenciam no processo de microaglomeração, que ocorre no seio da mistura a briquetar. Ele completa sua colocação, citando que a obtenção de sítios e/ou sementes (grânulos) na massa a ser usada na produção de briquetes por compactação; bem nucleados e resistentes, está associada ao grau de umidade adequada; cuja capilaridade da água na superfície das partículas primárias associadas à rotação do misturador, permite maior capacidade de nucleação dos grânulos.

De acordo com estudos realizados sobre o tema por D'Avila (2015), o fenômeno de micropelotização, nodulização ou granulação, que garantem uma boa mistura e um briquete bem compactado com boa resistência, é caracterizado pela formação e crescimento de novas partículas, devido à adesão das partículas primárias. Estes estudos mostram que existe um conjunto de eventos elementares que contribuem para mudar o número e/ou o tamanho das micropelotas. A nucleação, deposição e coalescência são os que predominam no processo de micropelotização. A nucleação representa a formação inicial de micropelotas, resultantes da interação entre as partículas finas livres. Deposição, por outro lado, ocorre pela interação entre as partículas livres e as micropelotas já formadas. Finalmente, coalescência representa o mecanismo de crescimento que ocorre como resultado da interação entre as micropelotas, formando o bolo da mistura final, que será briquetada.

D'Avila (2015) também comenta que alguns autores, estudando o fenômeno de adesão de partículas, identificaram forças de naturezas distintas que contribuem

para a atração e união das partículas, tais como: forças de Van Der Waals, potencial eletrostático devido ao contato, excesso de carga eletrostática, atração magnética, pontes líquidas, pressão capilar em poros ocupados por líquido, agentes ligantes de alta viscosidade, pontes sólidas, ligações por hidrogênio e ligações por estreitamento ou compactação. Entretanto, as mais importantes para a formação e resistência das micropelotas são as pontes líquidas e a força da capilaridade.

A contribuição da escória de aciaria (MRPL) em elevar o poder de aglomeração a frio (p.a.f.) e como aglomerante de cura a frio que garante um bom nível de resistência, de acordo com Arrivabene (2012), esta balizada no fato de que a capacidade aglomerante/ligante (a reatividade hidráulica) depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória. A reatividade de uma escoria de aciaria, se traduz em capacidade ligante (aglomerante de pega umida). Então com a diminuição do diâmetro das partículas, torna-se maior o seu grau de hidratação, bem como a indução da reatividade. Esta observação é muito pertinente, lembrando que, o termo hidratação refere-se às reações de materiais, com potencial cimentíticos (capacidade ou não de alguns de seus óxidos reagirem em meio saturado, formando sais insolúveis e estáveis), com a água que ocorrem com o transcorrer do tempo, dando origem a uma matriz firme e resistente funcionando como aglomerante/ligante, conforme cita Polisseni (2005) em seu estudo.

Polisseni (2005) cita que a escória moída finamente ou micronizada, possui um alto poder aglomerante aumentando também o valor de resistência final das misturas que a utiliza. Este “poder de aglomeração a frio” da escoria pode ser visualizado na macroestrutura do briquete (Figura 88), que apresenta os nódulos da fase cimentante dispersos, o que esta em concordância com Reis (2005) que define como poder de aglomeração a frio, a capacidade de materiais finos, sofrerem uma nodulização sob o efeito da umidade e mistura.

Observando também as micrografias em MEV (Figura 113) nota-se que, a dispersão da fase cimentante (escória) são partículas irregulares, que favorecem a aglomeração e são responsáveis por garantir boa resistência mecânica, conforme o trabalho de Reis (2005).

Sobre a afirmação de Reis (2005), D'Ávilla (2005) comenta que dessa forma, aliada à geometria dos grãos das matérias-primas e das partículas (fases) cimentadas formadas, a água também torna-se um dos principais agentes no mecanismo de adesão, apresentando maior força de atração que os demais fenômenos, já apresentados.

O efeito da água de adição, também como elemento atuante na resistência dos briquetes, é reiterado conforme mostra os resultados de León (1985) em seu trabalho com finos de carvão.

Segundo Telles (2009), no processo de aglomeração de partículas finas em prensas, as forças de atração molecular de Van der Waals apresentam uma forte influência na união das partículas. Entretanto, somente, tornam-se efetivas, quando a distância entre essas partículas é reduzida pela adição de um líquido ou pasta ou a ação de uma elevada força externa.

Este fato também é confirmado por França (2012), onde comentam que, a principal etapa de preparação de aglomerados minerais consiste na mistura dos materiais finos sólidos com água. A introdução do líquido conduz a uma série de eventos de aglomeração ou desaglomeração no sistema, de acordo com o seu teor. O líquido pode influenciar tanto no comportamento reológico (trabalhabilidade / moldabilidade / resistência a verde) quanto no desenvolvimento da microestrutura do material, definindo, alterando ou comprometendo seu desempenho final. No momento em que o líquido é adicionado no sistema, induz à formação de aglomerados, uma vez que ele é responsável pela união de várias partículas finas por forças de adesão, aumentando o esforço para a mistura, e depois pelo surgimento de forças capilares. Os aglomerados consistem de partículas pequenas fortemente ligadas devido ao aumento das forças de Van der Waals, as quais são superficiais atrativas e de curta distância, e exercem grande influência nas partículas pequenas, que têm elevada área superficial. A presença desses aglomerados conduz à heterogeneidades, sendo o cisalhamento imposto pela mistura o responsável pela quebra desses aglomerados, individualizando novamente as partículas, afastando-as e, assim, facilitando a homogeneização do sistema,

garantindo a moldabilidade e a resistência a úmido e a seco, aumentando as características mecânicas finais do aglomerado.

A resistência mecânica do briquete está relacionada com a efetividade de contato entre as partículas (intertravamento, forças moleculares, forças capilares) e ligantes, à tenacidade à fratura das fases presentes e à distribuição homogênea dos ligantes, confirmado por Lemos (2015) em seu estudo, onde o aumento da adição de água aumentou as forças de ligações entre as partículas, o que resultou em elevação dos requisitos de resistência desejados.

Cassola (1999) também reforça o afirmado pelos autores citados nos parágrafos anteriores, descrevendo que os fatores que afetam a produção de bons briquetes e que devem ser controlados são: tempo e pressão de compactação conforme o tipo de máquina e/ou processo; teor de umidade das matérias primas e da mistura a aglomerar; tamanho médio e distribuição das partículas; molhabilidade das matérias primas; natureza e quantidade de ligante.

Assim procurou-se trabalhar com um teor de água de adição de 10% sobre a massa total, orientando-se pelo indicado por Machado (2000) e Sant'anna (2012) visando a melhor resistência final possível.

A resistência alcançada no briquete é fruto também da relação água/cal, mantida em 0,15 conforme os resultados obtidos por D'Abreu e Filho (2004). A diminuição da relação água/aglomerante, torna o sólido mais compacto, com menor porosidade, gerando materiais mais resistentes. As resistências estão correlacionadas com a quantidade de poros do sólido, que por sua vez se correlacionam com e o índice de vazios. Sabe-se que maiores fatores água/aglomerante implicam em maiores índices de vazios e, conseqüentemente, menor resistência mecânica.

Baseado no que diz Silva (2013), o valor de resistência obtido no produto fruto desta pesquisa, e que é uma outra questão para se ressaltar, é a contribuição do efeito "Filler", onde qualquer material finamente dividido e uniformemente distribuído em uma massa qualquer aumentará a sua resistência pelo efeito de

empacotamento. A razão dureza/tenacidade é aprimorada com a redução do tamanho dos componentes da microestrutura ou da mistura que compõem o sólido.

Ribeiro (2007) também afirma que uma massa produzida com o resíduo do tipo escória, apresenta menor número de poros interligados; com a escória funcionando como um “Filler”, diminuindo os poros existentes, no material produto final, aumentando a resistência à compressão.

Galery (1986) nomeia este efeito (Filler) de “dispersão”, onde o termo dispersão é usado para definir o processo completo de incorporação de partículas sólidas finamente subdivididas numa determinada matriz, de maneira tal que o produto final constitua um estado uniforme de distribuição destas partículas sólidas no seio do material base, resultando em aumento das características mecânicas do componente.

A heterogeneidade da granulometria (variação do tamanho das partículas) normalmente existentes entre as matérias primas siderúrgicas, também afeta positivamente a resistência final, interferindo na “compactabilidade”, Em geral, partículas de dimensões diferenciadas, favorecem as forças que regem a aglomeração, garantindo resistência a seco ou após cura, conforme Pureza (2004).

León (1985), afirma que a distribuição granulométrica ótima para a briquetagem de finos, denominada OPSC (“optimum particule size consist”), deve ser formada por uma mistura de partículas maiores com suficiente quantidade de partículas finas, para preencher os interstícios entre os grãos, e conseqüentemente, maximizar o efeito da compactação aplicada no material.

Pileggi (1998) afirma que a natureza química das matérias-primas influencia o comportamento a verde (moldabilidade/compactabilidade) que afeta a resistência mecânica final a seco de misturas multi-constituídas, como a desta pesquisa, embora a distribuição granulométrica tem se mostrado como fator de maior relevância em ditar a resistência do briquete. Em relação a compactabilidade, este autor comenta que a mesma está logicamente ligada ao empacotamento de partículas, e referente a isto, cita a existência de dois domínios de forças, os quais se manifestam em função do tamanho das partículas presentes na mistura a

aglomerar (briquetar). Sobre as partículas maiores predominam forças de massa, enquanto sobre as mais finas dominam as forças superficiais.

Studart (1998) em seu artigo, também afirma que a distribuição de tamanho de partículas (ultra-finas, finas, médias e grossas) de uma mistura de matérias-primas, é que determina as suas características tecnológicas ou de aplicação. No caso da fabricação de aglomerados por compactação (briquetagem), para que se tenha uma boa moldabilidade ou fluidez desejada da mistura, as interferências físicas entre os grãos dos materiais durante a aplicação da força de compressão devem ser mínimas. Isto torna-se possível reduzindo propositalmente o fator de empacotamento da fração maior e garantindo que os vazios entre os grãos sejam ocupados por uma grande quantidade da fração menor, através do uso de aglomerantes hidráulicos, de um bom umedecimento do bolo a processar, de uma boa mistura a seco e a úmida e de introdução de aditivos finos (como carvão ou coque, cal, sílica, mogul, dextrina, amido de milho, calcário, dolomita). Além de propiciar alta fluidez a mistura, elevam o seu empacotamento e, conseqüentemente, sua resistência mecânica.

Mayerhofer (2007) e colaboradores, afirma que a etapa de moagem, certamente, é a mais importante do processo de beneficiamento de minérios, pois nesta é onde obtemos a finura requerida para as etapas seguintes e que afeta sobremaneira o p. a. f.. Tal importância é dada ao fato do tamanho de grão das matérias primas e distribuição granulométrica serem ponto de grande influência para formação de aglomerados a frio com boa resistência, reforçando a colocação de Pureza (2004), Pileggi (1998) e Studart (1998).

Diehl (1993) mostra em sua pesquisa, que matérias primas na forma de pós, submetidas a processos de compactação, respondem também ao fenômeno de “sensibilidade à compactação”, e que este está totalmente ligado a “densidade de empacotamento”, que descreve o espaço dos grãos do material base de uma mistura, num aglomerado preenchido com vários constituintes, e que define o nível final de resistência mecânica de um aglomerado a frio. Durante a compactação, a densidade de empacotamento dos grãos da matéria base é influenciada pelos materiais de enchimento como água, bentonita, cal, calcário, e carvão. A superfície

dos grãos do material base do aglomerado ficam mais lisos (em maior ou em menor grau) que os naturais, quando se adiciona um determinado ligante como bentonita, cal, cimento ou escórias, resultando num atrito menor durante a compactação, permitindo maior adensamento da mistura. A resistência a compressão é menos sensível à força aglomerante da bentonita (ligante padrão de aglomerados a frio de minério) e bastante dependente da energia de compactação que é sempre maior quanto menor for o atrito interno. O aumento da resistência a compressão depende menos da qualidade das pontes de ligação geradas pelos ligantes, mas muito do atrito interno gerado pelas tensões de compressão no aglomerado. Porém o mesmo autor alerta que elevados teores de água e de aglomerante como também o tipo do ligante atuam no afastamento dos grãos de matéria prima base entre si, ou seja, diminuem a densidade de empacotamento, que resulta e menores valores de resistência. Ahmed (2014), reforçando esta afirmação, e contrapondo Studart (1998), cita que materiais como calcário, dolomita, cal, carvão (mineral e vegetal), coque, escória de aciaria elétrica e também a bentonita (ocasionalmente) tem este efeito negativo sobre a compactação.

Em concordância com as afirmações de Ahmed (2014), comumente a resistência e a fratura de materiais combinados, que se apresentam com uma fase (cerâmica ou cimentícia) dura ou resistente dispersa homogeneamente numa matriz macia, advêm da diferença entre a deformação imposta a matriz e a deformação a qual a fase dura é submetida quando da aplicação, sobre o material, de um dado esforço. Assim sendo, avalia-se que em um material sólido, seja qual for o tipo, a interação sinérgica combinada com a quantidade e morfologia das fases presentes influenciam de maneira fundamental no comportamento mecânico desses materiais. De modo que a sua resposta aos esforços em uso esta ligada a sua estrutura que por sua vez é regida pela “regra das misturas clássica”, que dita a resistência mecânica final de compósitos minerais, como o briquete multiconstituído produto deste trabalho, como mostrado no item 3.1.1.

O desempenho mecânico da mistura proposta pode ser atribuído também ao comportamento de material cimentante da escoria de aciaria, conforme ABNT 5735, tendo um índice de 4,2 quando o mínimo é acima de 1 e aos demais índices que

qualificam este tipo de material como aglomerante de pega úmida de cura a frio como mostrados anteriormente no item 3.1.3.6.

Este comportamento cimentante da escória de aciaria também esta de acordo com o trabalho de Mymrin (2007) que correlacionou o mesmo aos valores de módulo de alcalinidade ou basicidade quaternária de escórias ferrosas resfriadas no solo (ao ar), denominadas ground-cooled ferrous slag (GCFS). Onde afirma que as mesmas apresentam incontestáveis propriedades de ligantes durante hidratação. Permitindo com isso a substituição da bentonita, que eleva bastante o custo dos produtos finais.

A expansão (sem efeito deletério devido a pequena granulometria) durante a mudança cristalina do silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ) da forma  $\beta$  para  $\gamma$  gera poros que permitem a interação com a água (pega hidráulica). As escórias com estrutura lisa, que não possui vazios em sua rede atômica para abrigar água livre, uma vez que o diâmetro médio desses vazios é inferior ao diâmetro médio das moléculas de água ( $2,2\cdot 10^{-10}\text{m}$ ), tem uma fraca interação com a água, não são higroscópicas, dada a inércia química da rede estrutural presente. Ou a hidratação de minerais presentes na composição das escórias de aciaria (devido a ação da umidade sobre componentes ricos em  $\text{CaO}$  ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou mesmo  $\text{CaO}$  na forma livre presentes nestes materiais), estes dois efeitos garantem também uma boa hidraulicidade (ou poder ligante), conforme cita Mymrin (2007).

O desenvolvimento de resistência no briquete produto desta pesquisa, pode ser também atribuído a adição de materiais aditivos, moídos finamente, com característica pozolânicas, como consta nos trabalhos de Aguilar (2005) e Couto (2010)

A análise dos resultados de Couto (2010) e colaboradores permite confirmar que as escórias de finamente divididas e em presença de umidade, formam compostos com propriedades aglomerantes, justificando plenamente ampliar sua utilização como material substitutivo da bentonita na fabricação de aglomerados a frio.

## 6 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados e comparando com as publicações congêneres, este trabalho concluí que :

É possível a mistura de pós finos dos resíduos carbonosos, ricos em ferro o óxido de ferro, fundentes e escoria de aço, gerados em uma usina siderúrgica integrada, na forma de briquete. Podendo até reduzir a quantidade de material injetado via ventaneira. Definindo-se também um novo uso para a escória de aciaria.

A escória de conversão e refino do aço possui características aglomerantes cimentícias que lhe permitem substituir a bentonita na aglomeração de finos de minério em briquetes auto-redutores ou auto-fundetes

O produto proposto, briquete multiconstituído, alcançou o valor de resistência próximo ao coque, como planejado

Este produto sendo auto-fundente pode ter o potencial de aumentar a produtividade do alto-forno

A resistência foi alcançada através da prensagem a frio e cura ao ar natural, eliminando a queima.

O briquete multiconstituído pode ser utilizado como carga ferrífera de grandes alto-fornos, diminuindo os custos do ferro base

O produto desenvolvido tem potencial de atender tanto os requisitos de ecologia quanto de econômica, objetivos da reciclagem.

O produto pode ser veículo de aproveitamento de resíduos da indústria cimenteira e de rochas ornamentais

Pode-se usar como fonte termo-redutora outra biomassa, como resíduos da agroindústria e de podas e limpeza urbanas, da indústria moveleira e da construção civil

Este briquete tem o potencial de ser um veículo para permitir a introdução de material plástico no alto-forno como borracha de pneumáticos automotivos.

Outros materiais podem substituir a bentonita (escoria de Forno Elétrico a Arco - FEA), como visto pelos valores de força de compressão.

O briquete multiconstituído apresenta um potencial de reduzir os materiais granulares adicionados como coque, minério, calcário e dolomita.

O produto desenvolvido, sendo uma carga metálica, pode vir a reduzir o uso de sinter e pelotas, reduzindo assim os investimentos nestes processos e a contaminação ambiental vinda das produção destes aglomerados

O briquete multiconstituído, produto resultado da pesquisa desenvolvida nesta dissertação, é uma extensão de linha, por conseguinte, possui o mesmo potencial de contribuição para preservação ambiental e economia de recursos naturais com redução de custos e impacto social positivo, que qualquer tipo de briquete possui, como mostrado nos Itens 3.7 e 3.8.

## **7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

O assunto matéria prima reciclada é muito amplo, assim sendo o autor desta tese propõe como trabalhos futuros:

- Produção de briquetes somente de carga termorreductora
- Adição de borracha de pneumáticos automotivos nos briquetes
- Produção de briquetes dessulfurantes e desfosforantes
- Uso de outras escórias ou somatórios de escórias como aglomerantes
- Produção de briquetes de escórias de ferro-ligas
- Adição de escórias de ferro-ligas em briquetes de minério de ferro

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M. T. P. ; CORRÊA, E. C. S. ; SANTOS, O. J. ; CETLIN, P. R. - **Caracterização microestrutural e mecânica de argamassas de revestimento fabricadas com adição de sílica ativa**. 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG

AHMED, H. M., VISWANATHAN, N., BJORKMAN, B. **Composite Pellets and briquettes - A Potential Raw Material for Iron-Making**. *Steel Research*, v.85, n.3, p.293-306, 2014

ANDRADE, H. L. ; DUARTE, J. C. ; BENTES, M. A. G. ; TÁRCIA, A. P. T. ; BRINK, V. – **O desenvolvimento de tecnologias de beneficiamento de resíduos industriais na companhia siderúrgica de tubarão**. 51º Congresso Anual da ABM, 05 à 09 de Agosto de 1996. Porto Alegre, RS. Vol. 4, pgs.: 247 à 260.

ARAÚJO, J. A. - **Reciclagem de pó de forno elétrico para a produção de aglomerado pré-fundido (APF) para uso em processo siderúrgico**. Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

ARRIVABENE, L. F. - **Adição de Resíduo da Indústria de Granito em Escória de Aciaria BOF visando sua utilização na Produção de Cimento**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2012

ASSUNÇÃO, F. C. R. - **Siderurgia no Brasil 2010-2025 : Subsídios para tomada de decisão**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília – DF, 2010.

BALTAZAR, A. W. S. ; CASTRO, J. A. ; SILVA, A. J. – **Modelamento matemático e simulação computacional de um ensaio de combustão de carvão pulverizado**. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 30 de Agosto a 2 de Setembro de 2005. Florianópolis – Santa Catarina, RS. Pgs.:55 á 64.

BAPTISTA, A. L. B. ; BAPTISTA, L. A. C.; BAPTISTA, R. C. - **Produção de tubos com costura em aço inox da classe “Lean Duplex” utilizados na construção de rede de tubulações para uso como modal dutoviário (gasodutos, oleodutos, granulodutos, minerodutos)**. Trabalho Apresentado no Espaço de Ciência, Tecnologia, Engenharia, Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia de 17 à 21 de Outubro de 2016 – EEIMVR/UFF – Volta Redonda - RJ

BAPTISTA, A. L. B. ; BAPTISTA, L. A. C.; BAPTISTA, R. C. - **Tubos Centrifugados de Aço Inoxidáveis para Indústria Petroquímica : Seleção, Características e Produção.** Trabalho Apresentado no Espaço de Ciência, Tecnologia, Engenharia, Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia de 17 à 21 de Outubro de 2016 – EEIMVR/UFF – Volta Redonda – RJ.

BAPTISTA, A. L. B.; BICALHO, L. A.; MAGNAGO, R. O. **Produção de tubos de concreto por centrifugação.** Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n. 27, p. 35-46, abr. 2015.

BAPTÍSTA, A. L. B. e GONÇALVES, I. S. - **A logística como ferramenta estratégica e de vantagem competitiva para fabricação de produtos ecologicamente corretos e sustentáveis "verdes": o caso da produção de tubos de aço empregados na indústria de óleo e gás.** Trabalho de Conclusão de Curso de Pós Graduação Lato Senso. MBA com ênfase em Logística Empresarial, como requisito parcial da obtenção do título de especialista. Volta Redonda, 2013

BAPTISTA, A. L. B; NASCIMENTO, I. A.; NASCIMENTO, A. M.; BAPTISTA, L. A. C.; SILVEIRA, R. M. S. **Histórico do desenvolvimento e revisão das características de aço inox duplex utilizado em tubos centrifugados para canalizações.** Contribuição Técnica ao 68º Congresso Anual da ABM , Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

BAPTÍSTA, A. L. B. ; BAPTISTA, L. A. C. ; NASCIMENTO, I. A. - **Aspectos básicos, conceitos e técnicas ligados ao desenvolvimento de produtos para o seguimento de exploração, produção e transporte de petróleo e gás : o caso de tubos de aço e ferro.** Revista Tubo e Cia – Ano IX – nº 57 – Jan. 2013, Págs. 12 à 27.

BAPTISTA, A. L. B. ; PASSOS, A. R. ; SILVEIRA, R. M. S. - **Tubos de Aço Inox Superduplex sem costura para a exploração do pré-sal.** Revista Tubo e Cia – Ano IX – nº 65 – Set. 2013. Págs.: 12 à 25

BAPTÍSTA, A. L. B. - **O desenvolvimento de produto fundido como fator estratégico para a criação de vantagem competitiva na indústria de petróleo e gás: estudo de caso dos tubos centrifugados de aço inoxidável duplex.** Projeto de Pesquisa de Conclusão de Curso de Graduação em Administração com Especialização em Gestão de Ciência e Tecnologia/Pesquisa e Desenvolvimento. Volta Redonda, 2011.

BAPTÍSTA, A. L. B.. **Tubos centrifugados de ferro fundido vermicular: características e produção.** In: 65º Congresso da ABM, RJ., 2010.

BAPTÍSTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A.; NASCIMENTO, A. M.; BAPTISTA, L. A. C. **Tubos centrifugados para indústria petroquímica: Desenvolvimento e Produção.** Revista Tubo e Cia. Ano VI, nº 32, Jul./Ago., 2010, P. 50 a 57.

BAPTÍSTA, A. L. B.; NASCIMENTO, A. M.; ROLIM, E.; NASCIMENTO, I. A.; BAPTISTA, L. A. C.; DAER, S. B. R.; **Tubos e Conexões de Aço Duplex na Indústria de Óleo e Gás** – Revista Tubo e Cia - Ano VI - nº 34 - Out./Nov. - 2010 - págs.: 48 à 55.

BAPTÍSTA, A. L. B.. **Desenvolvimento e produção de componentes hidráulicos em ferro fundido vermicular destinados ao saneamento e irrigação.** In: 64º Congresso da ABM, BH, 2009.

BAPTÍSTA, A. L. B.. **Tubos Centrifugados para Indústria Petroquímica: Projeto e Fabricação.** In: 54º Congresso da ABM, São Paulo - SP, 1999

BAPTÍSTA, A. L. B.. **Alguns Aspectos Ligados ao Projeto e Fabricação de Tubos Centrifugados para Indústria Petroquímica.** In: 1ª Semana de Engenharia da Região Sul-Fluminense. EEIMVR/UFF - Volta Redonda - RJ, 1996.

BARROS, O - **Siderurgia - 2016** . DEPEC-BRADESCO - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. 2016

BENIQUE, F. S. B. - **Contribuição à auto-redução carbotérmica de aglomerados contendo óxidos de manganês.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BERNARDES, L. J. L. - **A Granulação de Materiais** . Cerâmica Industrial, 11 (3) Maio/Junho, 2006, pags.: 17 a 22

BORGHI, M. M. - **Efeito da granulometria na avaliação dos briquetes.** Trabalho de Conclusão de Curso - Título de engenheiro industrial madeireiro. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. Jerônimo Monteiro - Espírito Santo, 2012

BÜLHER, R. R. – **Cenário mundial da indústria siderúrgica.** Instituto Brasileiro de Siderurgia. Apresentação para Pós-Graduação ABM/FEI em Metalurgia com ênfase em Siderurgia. São Paulo, 02 de Setembro de 2005.

BUZIN, P. J. W. K. - **Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGEM, Porto Alegre / 2009

CALDAS, J. A. C. - **Análise de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética.** Trabalho Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora. Curso de graduação em engenharia de produção. Juiz de Fora, 2011

CARDOSO, T. L. M. - **Análise de riscos da aplicação de nova tecnologia.** Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de Agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

CARPIO, R. C. - **Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, Novembro de 2005

CARVALHO, E. A. ; BRINCK, V. ; CAMPOS, A. R. ; FONSECA, V. O. - **Aglomerção.** Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro , Agosto/2010

CASSOLA, M. S. ; MORAES, S. L. ; FILHO, M. T. – **Aglomerção de finos de óxido de ferro de resíduo industrial.** II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro – Caracterização, Beneficiamento e Agglomerção da ABM. 17 a 20 de Outubro de 1999. Escola de Minas – UFOP - MG - Pgs.: 247 à 263

CASTRO, A. A. - **Avaliação de Propriedades em Altas Temperaturas de Pelotas para Alto-Forno.** Dissertação de Mestrado. Rede Temática em Engenharia de Materiais UFOP - CETEC - UEMG. Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 22 de Dezembro de 2006

CASTRO, J. A. ; GONÇALVES, J. M. ; BALTAZAR, A. W. S. ; SILVA, A. J. ; VILELA, A. C. F. ; OSÓRIO, E. – **Estudo do comportamento do alto-forno operando com injeções auxiliares de carvões mineral e vegetal pulverizados.** XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas / VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 12 a 15 de Setembro de 2006. Ouro Preto – Minas Gerais. Vol.: 1 – Págs.: 223 à 231.

CASTRO, J. A. ; GONÇALVES, A. P. ; SILVA, A. J. – **Estudo de técnicas de recirculação do gás do leito de sinterização visando diminuir a emissão de dioxinas e furanos.** XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 18 a 21 de setembro de 2007. Salvador - Bahia, Brasil

CHAGAS, A. S., CARVALHO, R. M., TAVARES, L. M. M. - **Caracterização de pelotas de minério de ferro como ferramenta de previsão da degradação no manuseio.** Painel PEMM 2012 - 24, 25 e 26 de outubro de 2012 – PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

CHEVRAND, L. - **Aciaria elétrica – situação atual e tendência até 2025.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Ciência, Tecnologia e Inovação. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Rio de Janeiro, 2008

COELHO, M. A. M. ; SILVA, M. G. ; SOUZA, F. L. S. ; SARMENTO, R. ; ZANDONADE, E. ; MORIMOTO, T. - **Avaliação de propriedades de concreto com escória de alto-forno ativada quimicamente.** 60º Congresso da ABM, Rio de Janeiro, 25-28 de julho de 2005 – Belo Horizonte - MG

CORREA, G. T. - **Perspectivas da siderurgia a carvão vegetal no Brasil** .Tocantins Florestal / Vetorial Siderurgia. Palmas - 19 de Novembro de 2013

COSTA, J. E. S. - **Processos de redução.** Caderno Técnico. CVTEC, 2013

COSTA, L. .B. - **Avaliação do envelhecimento de reparos estruturais constituídos de materiais compostos.** Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2010.

COSTA, M. M. - **Princípios de Ecologia Industrial Aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos Sistemas de Produção de Aço.** Tese de Doutorado em em Ciências em Planejamento Energético. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), R.J. - Brasil , Dezembro de 2002

COSTA, P.H.C. et alii - **Tecnologia TecnoRed: um grande salto de produtividade na indústria siderúrgica.** Simpósio Siderurgia no Século XXI. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Junho; 2001

COSTA e SILVA, A. L. V. - **Panorama Setorial : Aciaria LD. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico até 2025.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Ciência, Tecnologia e Inovação. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Rio de Janeiro. Agosto, 2008

COSTA, R. V. P. - **Otimização da Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta pela Aplicação de Projeto Robusto.** Dissertação de Mestrado. REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Abril de 2008

COUTO, C. ; ALMEIDA, J. A. ; Pinto, J. D. S. ; BAMBERG, P. , STARLING, T. - **Influência da pozolanicidade da escória de alto-fornos nas propriedades de argamassas e concretos duráveis.** Revista Construindo, Belo Horizonte, v.2, n.1, p.31-34, jan./jun. 2010

CUNHA, A. F. - **Caracterização, Beneficiamento e Reciclagem de Carepas Geradas em Processos Siderúrgicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Ouro Preto, Fevereiro de 2006.

D'ABREU, J.C. - **Auto-redução, um caso brasileiro de sucesso.** Metalurgia & Materiais, v. 57, n. 506, pp. 52-55; 2001

D'ABREU, J. C. ; FILHO, R. N. R. – **Contribuição ao estudo da aglomeração de finos utilizando cimento ari, cimento AL - 61 e cal hidratada.** Revista Tecnologia em Materiais, São Paulo, v. 1, n. 2, p.5 – 9, out. – Dez. 2004.

D'ABREU, J. C. – **Tecnologia e Inovação na Siderurgia.** PUC – Rio/ABM, Rio de Janeiro, Julho de 2009

D'AVILA FILHO, B. M. - **Estudo prospectivo do setor siderúrgico até 2025: metálicos para aciarias - sucatas, gusa, ferro esponja.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, 2008.

D'AVILA, L. S. C. - **Influência das Características do Itabirito Concentrado no Desempenho do Processo de Sinterização.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Área de Concentração: Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, Dezembro/2015

DE PAULA, G. M. - **Desenvolvimento Tecnológico, Alianças Estratégicas e Apoio Governamental: O caso Tecnored,** 2002

DIEHL, M. D. – **Interação entre areias de macharia e areias de moldagem a verde.** XXV Seminário sobre Aciaria, Refratários, Fornos Elétricos, Ferro-Ligas e Fundição da ABM. 28 a 30 de Setembro de 1993 – Porto Alegre – RS. Vol. II - Págs.: 289 à 308.

DUART, J. C. ; ANDRADE, H. L. ; NAKAMURA, A. T. ; COURA, J. C. ; BENEVENUTE, A. A. – **A utilização de briquetes de lama de aciaria em substituição a sucata na carga metálica de convertedores na CST.** XXVII Seminário sobre fusão, refino e solidificação do aço (Aciaria, refratários, fornos elétricos, ferro-ligas e fundição) da ABM. 20 a 22 de Maio de 1996 – Belo Horizonte – MG. Págs.: 267 à 283.

EFFTING, C. - **Aglomerantes.** Materiais de Construção I - UDESC - Centro de Ciências Tecnológicas Departamento de Engenharia Civil, Joinville, 2014

ELKASABGY, T. ; D'Abreu, J. C. – **Seleção de testes para avaliação de aglomerados de minério de ferro para alto-forno.** Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. 1, nº 1 , 1981.

ENDEMANN, G. ; LÜNGEN, H. B. - **Recycling and closed material circles in the steel industry.** 2015

ESPÓSITO, T. ; MANTILLA, J. N. R. ; GARDONI, M. G. ; JUNIOR, M. F. J. – **Estudo da viabilidade do aproveitamento dos rejeitos de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.** – XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 30 de Agosto a 2 de Setembro de 2005. Florianópolis – Santa Catarina, RS. Pgs.: 713 à 723.

FERRAGUTTI, A.C. et al. **A resistência dos briquetes.** Revista Biomassa e Bioenergia, Sorocaba, v. 6, n. 4, p. 16-22, 2012.

FARIA, R. A. F. - **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas e da durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás Escola de Engenharia Civil. Curso de Mestrado em Engenharia Civil. Goiânia /2007

FILHO, L. S. B. ; BRAGA, E. M. - **Tecnologia Metalúrgica.** Universidade Federal do Pará Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Belém, 2010

FLORES, B. D. ; GUERRERO, A. ; BORREGO, A. G. ; DÍEZ, M. A. ; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. - **Comportamento de carbonização de briquetes de ferro-**

**coque.** Contribuição técnica ao 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro da ABM, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

FONTES, P.J.P. et al. **Aspectos técnicos da briquetagem do carvão vegetal no Brasil.** Laboratório de produtos florestais. Brasília, 1989. p. 2-13.

FONTES, P. J. P. ; QUIRINO, W. F. ; JÚNIOR, F. P. - **Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal.** Laboratório de produtos florestais. Brasília, 1984

FRANÇA, M. S. de; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G, **Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, abr./jun. 2012.

FURTADO, M.A.T et alii (2000). **A gestão de pesquisa e desenvolvimento em empresas siderúrgicas privatizadas.** Revista de Administração, v. 35, n. 1, pp. 51-62

FREIRE, E. ; MONTEIRO, E. E. C. e CYRINO, J. C. R. - **Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro.** Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia - Jul/Set-94, pgs.: 25 à 32.

GALERY, R. ; PERES, A. E. C. – **Estudo de dispersão no sistema willemita/dolomita.** Revista Metalurgia/ABM – Vol. 42, nº 340, Março de 1986, pgs.: 153 à 156.

GALVÃO, A. C. F. - **Materiais avançados no Brasil 2010-2022.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) - Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília-DF, 2010

GERVÁSIO, H. e SILVA, L. S. - **A sustentabilidade do aço,** V Congresso de Construção Metálica e Mista, 2005 - pags. 721 a 730

GEYER, R. M. T. ; MASUERO, A. B. ; VILELA, A. C. F. ; DAL MOLIN, D. C. C. – **Escórias siderúrgicas: caracterização e aplicação para a indústria da construção civil.** XXV Seminário da ABM de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia. 28 de Novembro a 02 de Dezembro de 1994. Volta Redonda, RJ Pgs.: 363 à 381

GEYER, R. M. T. - **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio

Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM . Porto Alegre, 2001

GISLON, E. S.; LUZA, A. L. ; FABRIS, D. C. N.; MACHADO, M. M. ; MONTEDO, O. R. K. - **Tecnologia de produção de coque em forno túnel a partir de pó de carvão compactado**. Grupo de Pesquisa Valora, Instituto de Engenharia e Tecnologia - IDT, Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2006

GOMES, M. A. - **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Ouro Preto. Dezembro/2009

GORNI, A. A. - **Aproveitamento de plástico pós-consumo na forma de combustível para altos-fornos e coquearias**. Revista Plástico Industrial, Janeiro 2006, pág. 84-100

GRAF, R. – **Cokeless cupola to channel furnace duplexing: a melt plant for the futur**. In.: AFS Transactions, v. 91, 1993 –pp.691 – 695.

GUMIERI, A. G. - **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2002

IBRAM - **Instituto Brasileiro de Mineração, Informações Sobre a Economia Mineral Brasileira 2015**. Brasília, Outubro/2015

JUNCA, E. ; OLIVEIRA, J. R. ; ESPINOSA, D. C. R. ; TENÓRIO, J. A. S. **Briquetagem da gralha de aço recuperada do resíduo de rochas ornamentais**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 64(2), 175-179, abr. jun. | 2011

KAMINSKI, D. ; PERUCH, F. - **Estudo da influência do uso de aglomerantes sobre as propriedades do coque metalúrgico**. XVIII CREEM - Erechim, 21 a 24 de Novembro de 2011 ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas,

KASAI A, MATSUI Y, NOMA F, IWAKIRI F, SHIMIZU M. - **Cold strength enhancement mechanism of carbon composite iron ore hot briquet**. Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 2001: p. 313-319.

KOTENEV, V. I.; BARSOUKOVA, E. J.; KOUROUNOV, I. F. - **Carbon and iron containing briquettes: a new composite charge material for metal works and a highly profitable way of wastes recycling**, 2013

KUHN, D. ; BAIROS, F. ; PORN, J. – **Sustentabilidade Empresarial. Meio Ambiente**. Revista da Abifa. Fundação e Matérias-Primas. Ano XIV, Agosto de 2011, nº. 135 – Pgs.: 52 e 53

KURUNOV, I. – **Environmental aspect of industrial technologies for recycling of Fe and Zn containing sludge and dust**. Novolipetsk Steel, 2011.

LEMOS, L. R. - **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Belo Horizonte, Fevereiro de 2015

LEÓN, A. B. T. – **Estudos de pelletização e briquetagem de finos de carvão mineral**. Laboratório de tecnologia Mineral. Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS. Porto Alegre, Dezembro de 1985.

LEONARDO, A. - **Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia. Departamento de Física e Química - Instituto de Ciências. Dezembro de 2006

LIMA, I. T ; QUITES, E. E. C. ; MARTINS, J. G. P. ; MARANHA, S. P. D. ; MYAZAKI, M ; SANTOS, J. B. ; OSIAS, M. M. ; SILVA, G. C. ; PAIVA, J. R. ; COELHO, M. F. M. ; PEDRO, J. V. ; PEREIRA, E. M. L. – **Redução de dependência de coque importado na COSIPA**. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas / VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 12 a 15 de Setembro de 2006. Ouro Preto – Minas Gerais. Vol.: 1 – Págs.: 378 à 388.

LIMA, J. R. B. – **Estudo da carboxi-metil-celulose como aglomerante para pelletização de concentrados de minério de ferro**. XXV Seminário de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia da ABM. 28 de Novembro a 02 de Dezembro de 1994. Volta Redonda, RJ.

LOBATO, N. C. C. ; VILLEGAS, E. A. ; MANSUR, M. B. - **Avaliação de alternativas tecnológicas para o gerenciamento das escórias de alto-forno e de aciaria**. Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil. Págs.: 970 à 980

LOPES, M. V. - **Caracterização de Sínter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Tese de mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Itajubá, Dezembro de 2012.

LOPES, P. M. ; MARTINS, B. ; JULIANELLI, A. M. ; ASSIS, P. S. – **Determinação das propriedades físico-químicas do minério de ferro para o estudo de sua reutilização em processos siderúrgicos**. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas / VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 12 a 15 de Setembro de 2006. Ouro Preto – Minas Gerais - Vol. 2 - Pgs.: 634 á 641.

LURY, V. G. ; TARENTIEV, Y. I. - **Manufacture of fuel briquets**. Fuel and Energy Abstracts, Volume 38, Issue 3, May 1997, Page 138.

LUZ, A. B. e LINS, F. A. F. - **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2ª Edição. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2008

MACHADO, A. T. - **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

MADAS, R. T. C. – **Iron and Steel – Vision 2020**. Indian Bureau of Mines. 2015

MADIAS, J. – **Alternatives for hot metal production: cupola, induction and arc furnace**. COLFUN, Buenos Aires, Argentina, October 28 - 30, 2010.

MAGOSSI, D. C. - **A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguariaíva - Paraná**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Pós-graduação em Engenharia Florestal - Setor de Ciências Agrárias. Curitiba /2007

MANN, R. - **Tecnored Ironmaking: a new technology creates a new business model for the steelmaker**. XVI Steel Success Strategies. New York, American Metal Market and World Steel Dynamics, Junho; 2001

MAN-SHENG, C., ZHENG-GEN, L., ZHAO-CAI, W., JUN-ICHIRO, Y. **Fundamental Study on Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette Used as Blast Furnace Burden**. Steel Research, v.82, n.5, p.521-528, 2011.

MARTINS, J. – **Abordagem sistêmica do processo de pelletização com ênfase no pelletamento.** II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro – Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Divisão Técnica de Tecnologia Mineral. 17 a 20 de Outubro de 1999. Escola de Minas – UFOP - Ouro Preto, MG. Págs.: 239 à 246

MASUERO, A. B. ; GEYER, R. T. ; VILELA; A. C. F. ; Dal Molin, D. C. C. – **Aproveitamento de escórias siderúrgicas na construção civil.** - 50º Congresso Anual da ABM, São Pedro, SP, 01 a 04 de agosto de 1995. Vol. 4 – pgs.: 693 à 712.

MATOS, U. F. - **Análise da injeção simultânea de gás natural e diferentes misturas de carvões pulverizados (PCI) utilizando o modelo total do alto-forno.** Dissertação Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda/2006

MATOS, U. F. ; CASTRO, J. A. - **Modelamento da utilização de aglomerado autorredutor em minialto-forno com recirculação de gás de topo.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 65(1), 65-71, jan. mar. | 2012

MAYERHOFER, F. ; FERNANDES, R. B. ; ALVARENGA, T. F. ; VIEIRA, C. A. O. ; MELLO, M. – **Aumento de produtividade da moagem Nibrasco através dos hidrociclones cavex.** XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 18 a 21 de Setembro de 2007, Salvador – Bahia, Brasil – pgs.: 535 à 543

MAXIMIANO, M. - **Estudo da influência da alumina no índice de degradação sob redução do sínter de minério de ferro.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário da Zona Oeste - UEZO. Rio de Janeiro/ 2011

MEDINA, H. V. **Produção e Uso Sustentável de Materiais: Gestão Ambiental e Análise do Ciclo de Vida.** Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ .

MEDEIROS, D. O. ; PEREIRA, L. V. S. L., CAVALCANTE, M. N. ; SILVA, R. M. S. - **Introdução aos estudos dos materiais compósitos analisando o modelo da regra das misturas.** Instituto Federal de Alagoas, IFAL. PIBIT - 7 de setembro de 2014

MENDONÇA, C. F. ; MOURÃO, J. M. ; FREITAS, G. G. ; STEGMILLER, L. ; PEREIRA, J. R. – **Agglomerantes para pelletização de minérios de ferro.**

Seminário de redução de minérios de ferro e matérias primas. 19 a 22 de Setembro de 1983. Cubatão, SP. Pgs.: 129 à 150.

MELO, L. C. P. - **Recomendações para inovação tecnológica na siderurgia do Brasil até 2025.** Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília / 2009

MEYERS, M. A. ; MEYERS, P. P. – **Ensaio Mecânicos em Pelotas. Análise Matemática do Ensaio Convencional.** Revista Metalurgia – ABM, Vol. 37, nº 286, Set. 1981.

MEYERS, M. A. ; MEYERS, P. P. – **Ensaio Mecânicos em Pelotas. Verificação da Resistência à Compressão.** Revista Metalurgia – ABM, Vol. 39, nº 305, Abr.. 1983.

MORAES, C. A. M. ; EVALDT, D. C. ; CAMACHO, A. L. D. ; KICH, A. M. - **Caracterização de carepa metálica visando sua valorização como coproduto.** Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

MOURÃO, J. M. - **Minério de Ferro e Pelotas Situação Atual e Tendências até 2025** Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Brasília , 2008

MOURÃO, J. M. ; GARIGLIO, E. ; PICCOLO, A. L. ; TOLENTINO, J. J. R. – **Matérias-primas para a pelletização, face às exigências tecnológicas e de comercialização das pelotas de minério de ferro.** Seminário da ABM de Inovações Tecnológicas na Área de Redução de Minério de Ferro. 30 de Novembro a 4 de Dezembro de 1992. Santos, SP. Pgs.:53 à 79

MOREIRA, A. – **Fabricação Sustentável e Ecológica de Aços Inox.** São Paulo, 2009.

MUNIZ, G. L . F. – **Avaliação de minérios finos da MBR para sinterização.** 46º Congresso Anual da ABM. Comissão Técnica de Matérias-Primas. Setembro de 1991. Vol. 1. Pgs.: 29 à 42.

MYMRIN, V. ; PONTE,H – **Diferentes tipos de escórias ferrosas resfriadas ao ar utilizadas como material ligante na construção de bases de estradas.** XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 18 a 21 de Setembro de 2007, Salvador – Bahia, Brasil Pgs.: 112 à 122.

NEPOMUCENO, S. ; ASSIS, R. M. ; VIEIRA, C. B. ; ASSIS, P. S. – **Efeito da permeabilidade de leitos na produtividade de altos-fornos**. XXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro da ABM. 04 a 06 de Dezembro de 1996, Santos, SP. Pgs.: 607 à 624

NOLDIN JR., J. H. ; D'ABREU, J. C. – **Tecnored Trios – Convertendo custos em lucro**. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 30 de Agosto a 2 de Setembro de 2005. Florianópolis – Santa Catarina, RS – pags.: 467 à 476.

NOLDIN JR., J. H. ; D'ABREU, J. C. ; MARCHEZE, E. S. ; COSTA, P. H. C. - **Flexibilidade de matérias-primas no processo Tecnored**. Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3, n.3, p.22-27, jan.-mar.2007

NOLDIN JR., J. H. ; D'ABREU, J. C. ; ARAUJO, D. R. - **Tecnologias emergentes da siderurgia primária. Novas oportunidades?** , 2008

NONATO, C. F. S. ; PEREIRA, G. L. ; MORAIS, L. D. ; PINTO, M. P. ; OLIVEIRA; S. C. R. – **Moagem da Bentonita a Granel na Usina de Pelotização de São Luis**. XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 18 a 21 de Setembro de 2007, Salvador – Bahia, Brasil – pgs.: 674 à 681

OLIVEIRA, V. M. - **Estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte. Julho/2010

OLIVEIRA, R. R. L. - **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com parafina: caracterização de algumas propriedades**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, Campus - Sorocaba, 2013

OLIVEIRA, T. L. - **Análise energética e exergética de biomassas como fonte energética sustentável em um Forno elétrico a arco** . Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, Abril de 2013.

PADILHA, F. A. – **Materiais, Ciência dos Materiais e Engenharia de Materiais**. Seminário de Materiais Avançados. São José dos Campos, SP – 20 a 23 de Novembro de 1989.

PASSOS, A. E. K. D. - **Avaliação das Rotas Alternativas de Produção de Ferro Gusa**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Curso de Engenharia Metalúrgica . Rio de Janeiro, Junho/2009

PEREIRA, E. A. C. – **Aspectos técnicos da gestão de resíduos das siderúrgicas integradas a coque**. XXV Seminário da ABM de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia. 28 de Novembro a 02 de Dezembro de 1994. Volta Redonda, RJ. pgs.: 187 à 199.

PEREIRA, F. A. ; CARNEIRO, A. C. O. ; VITAL, B. R. ; LÚCIA, R. M. D. ; JÚNIOR, W. P. ; BIANCHE, J. J. - **Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio**. Revista Floresta e Ambiente, v.16, n.1, p. 23 - 29, 2009

PEREIRA, R. P. F. ; FERNANDES, J. L. ; XAVIER, L. S. - **Confiabilidade na inovação tecnológica**. 60º Congresso da ABM, Rio de Janeiro, 25-28 de julho de 2005 – Belo Horizonte - MG

PEREIRA, S. A. C. - **O Mercado de Minério de Ferro**. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Junho 2012

PETRY, J. K. L. – **Production of Iron and Steel. Integrated Pollution Prevention and Control**. Institute for Prospective Technological Studies. Sustainable Production and Consumption. 2009

PIETSCH, W. **Agglomeration process: phenomena, technologies, equipment**. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 622 p.

PILEGGI, R. G. ; PANDOLFELLI, V. C. – **Influência da Distribuição Granulométrica das Partículas Menores que 1 µm sobre a fluidez de concretos refratários auto-escoantes com ultra-baixo teor de cimento**. XXIX Seminário sobre fusão, refino e solidificação dos metais da ABM(Aciaria, refratários, aciaria elétrica, ferro-ligas e fundição). 11 a 13 de Maio de 1998 – São Paulo – SP. Págs.: 153 à 163.

PIMENTA, H. P. ; PACHECO, T. A. ; CARDOSO, M. B. – **Caracterização tecnológica de minério de ferro para sinterização**. II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro – Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Divisão Técnica de Tecnologia Mineral. 17 a 20 de Outubro de 1999. Escola de Minas – UFOP - Ouro Preto, MG.

PINTO JUNIOR, L. A. B. - **Fabricação de cimento Portland contendo mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito.** Tese de Mestrado. Instituto Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Vitória, 2012

POLICARPO, F. F. - **Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica.** Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais – CEERMIN. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Junho 2012

POLISSENI, A. E. - **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre 2005

POLISSENI, A. E. - **Escória de aciaria elétrica micronizada: desempenho de argamassas frente ao ataque íons cloreto.** Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Págs.: 2453 à 2463.

POPPINGA, P. - **Situação e Perspectivas do Mercado de Minério de ferro.** Congresso Brasileiro do Aço, 26ª edição. São Paulo, Brasil, 12 - 14 de julho, 2015

PUREZA, J. C. C. - **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2004

QIZHOU, C. ; BOKANG, W. - **Recent development of ductile cast iron production technology in China.** China Foundry, Vol.5 No.2, May 2008, 82 – 91.

QUINTAL, C, R. S. - **Minério de Ferro.** Caderno Técnico. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010

REIS, E. L.- **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM - Unidade Morro da Mina.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de pós-graduação em Engenharia Mineral. Área de concentração: Tratamento de Minérios. Ouro Preto, Abril de 2005

REIS, W. L. C. - **Otimização da reciclagem de resíduos siderúrgicos por redução carbotérmica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia . Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos /2008

REZENDE, E. F. ; REIS, E. R. ; BRUM, J. S. ; ASSIS, P. S. – **Uso de biomassa na siderurgia**. XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 18 a 21 de Setembro de 2007, Salvador – Bahia, Brasil. Vol.: 1 – Págs.: 470 à 481

RIBEIRO, V. A. S., da SILVA, A. L., da SILVA, M. R., DIAS, J. C. - **Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassa**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 339 – 345, 2007

RIZZO, E. **Introdução aos processos siderúrgicos**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: São Paulo, 2005.

ROCHA, E. P. A. , SOUZA, D. F., DAMASCENO, S. M. - **Estudo da viabilidade da utilização de briquete de capim como fonte alternativa de energia para queima em alto-forno** VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica 27 a 30 de julho de 2009, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

ROCHA, F. ; TERRA, F. ; VIANA, F. ; PAULO, J. ; MANSUR, A. A. P. ; SANTOS, D. B. ; MANSUR, H. S. - **Caracterização morfológica, cristalográfica e espectroscópica de escória da etapa de refino em aciaria**. 5ºEnemet – Encontro Nacional de Estudante de Engenharia Metalúrgica e Materiais - Belo Horizonte / Ouro Preto – MG – 25 a 29 de julho de 2005

ROSENQVIST, T. In: **Principles of Extractive Metallurgy**. 2ªEdition. McGraw-Hill Book Company, 1986.

ROSSIGNOLO, J. A. ; PALLONE, E. M. J. A. - **Ciência e Tecnologia dos Materiais: Materiais compósitos**. Universidade de São Paulo, 2012

DAVID, S. F. ; SILVA, M. B. ; NASCIMENTO, R. C. ; MACHADO, M. L. P. - **Modelo de redes neurais artificiais para predição do teor de enxofre no ferro gusa de altos fornos**. Contribuição técnica Apresentada ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil. Pgs.: 1675 à 1682.

SÁLVIO, F. E. C. ; MEDINA, H. V. - **Produção Sustentável de Aço no Brasil**. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2009

SAMPAIO, R. S. – **As inovações tecnológicas nos processos de produção de aço e suas implicações na produção de ferro primário**. Seminário de inovações tecnológicas na área de redução de minério de ferro. 30 de Novembro a 4 de Dezembro de 1992 – Santos – SP. Págs.: 01 à 20.

SANT'ANNA, M. C. S. ; LOPES, D. F. C. ; CARVALHO, J. B. R. ; SILVA, G. F. - **Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.14, n.3, p.289-294, 2012

SHACKELFORD, J. F. – **Introdução a ciência dos materiais**. 6ª ed.. Ed. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2008.

SENK, D. ; BABICH, A. ; GUDENAU, H. W. - **Waste and dust utilisation in shaft furnaces**. Rev, Metal Madrid Vol Extr, (2005) , 284-288

SILVA, A. C. - **Aglomerção mineral : Briquetagem**. Curso de Especialização em Tratamento de Minérios, MG - 2013

SILVA, A. M. ; NOBLAT, S. J. X. ; MEDRADO, S. B. ; JUNIOR, J. A. C. – **Utilização de coque de petróleo nas misturas injetadas nos altos-fornos da CSN**. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 12 a 15 de Setembro de 2006, Ouro Preto – Minas Gerais - Brasil. Vol.: 1 - Págs.:434 à 443

SILVA, F. A. - **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

SILVA, J. B. R. ; CARVALHO, K. M. G. ; FILHO, P. S. B. ; LIMA, P. R. B. ; ROSSI, L. A. - **Análise de risco ambiental no uso de escória de aciaria para aplicações rodoviárias**. Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

SINGH, V. ; GOKARN, P. ; KUMAR, A. ; NANDA, B. D. ; BHATTCHARJEE, A. – **Agglomeration of Ferromanganese Alloy Fines to Use in LD Steel Making Process**. 50<sup>th</sup> National Metallurgists' Day , ATM of the Indian Institute of Metals.

SOUSA, C. S. - **Análise exergética do processo de produção de ferro gusa em altos-fornos: identificação de oportunidades em redução de emissões de gases de efeito estufa.** Dissertação de Mestrado Profissional. Faculdade de Aracruz . Mestrado profissional em tecnologia ambiental . Aracruz /2010

SOUSA, F. O. ; ARAÚJO, G. M. - **Estudo da influência da hidratação complementar nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras.** In.: Revista Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 12, n. 2, p.134-139, abr./jun. 2015

SOUZA, F. T. - **Mini alto-forno flex-fuel operando com carga auto-redutora.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2008

SOUZA, F. T. ; CASTRO, J. A. ; CASTRO, L. F. A. ; SILVA, A. J. - **Análise computacional do carregamento de briquetes de resíduos em mini altos-fornos.** 60º Congresso Anual da ABM - Internacional, Belo Horizonte - MG, 25 a 28 de Julho de 2005.

SOUZA, F. T. ; CASTRO, J. A. ; SILVA, A. J. – **Operação do alto-forno a oxigênio com altas taxas de injeção de carvão e recirculação de gás de topo em dois níveis de ventaneiras.** XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 30 de Agosto a 2 de Setembro de 2005. Florianópolis – Santa Catarina, RS. Pgs.: 45 à 53

SOUZA, C. C. B. M. ; CHAVES, A. P. – **Aplicação dos métodos de processamento mineral na reciclagem de vidro.** XVII Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa e I Seminário de química de colóides aplicada à tecnologia mineral da ABM. 23 a 26 de Agosto de 1998 – Águas de São Pedro, SP

SPIRI, F. - **A Influência do Crescimento Econômico dos Brics no Mercado de Minério de ferro.** Trabalho de Conclusão de curso. Universidade Estadual de Campinas - Unicamp . Instituto de Economia. Campinas . Julho 2012

STUDART, A. R. ; VENDRASCOS, S. L. ; PANDOLFELLI, V. C. – **Características relevantes das microssílicas utilizadas para a produção de concretos refratários auto-escoantes de ultra-baixo teor de cimento.** XXIX Seminário sobre fusão, refino e solidificação dos metais da ABM (Aciaria, refratários, aciaria elétrica, ferro-ligas e fundição). 11 a 13 de Maio de 1998 – São Paulo – SP. Págs.: 165 à 175.

TAKASHI, A., KIYOSHI, F., HIDEKAZU, F. **Development of Carbon Iron Composite Process Production**. JFE Giho, n.22, p.20-24, 2008

TANAKA, M. T. - **Estudo experimental de briquetes autor-redutores e auto-aglomerantes de minério de ferro e carvão fóssil**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2014

TAKANO, C. ; MOURÃO, M. B. – **Aproveitamento de resíduos de sinterização por auto-redução**. 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, RS, 4 a 8 de Agosto de 1996. Vol. 4 - Pgs.: 261 à 271.

TAKEHARA, L. ; JUNIOR, F. C. – **Estudo do comportamento dos diferentes tipos de sinter feed de minérios de ferro durante o processo de microaglomeração**. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 30 de Agosto a 2 de Setembro de 2005. Florianópolis – Santa Catarina, RS. Pgs.: 313 à 322.

TELLES, F. F. G. ; ABREU, E. J. P. ; HALASZ, M. R. T. ; ARAÚJO, J. A. - **Reutilização de resíduos finos oriundos do processo siderúrgico**. In.: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica - 27 a 30 de julho de 2009. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

THACKER, K. B. - **Analysis of parameters for casting ductile iron pipe-A Review**. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 1, January-February, 2015

TURANI, L. O. ; TAISS, Ed J. M. - **O contexto do marketing na gestão de desenvolvimento de novos produtos : um estudo de caso na usiminas** . Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

VALENTINA, L. V. D. ; HINZ, R. T. P. ; FRANCO, A. P. - **Produção mais limpa e avaliação do ciclo de vida: estratégias para garantir o desenvolvimento sustentável**. Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

VARGAS, U. ; CABRAL, E. ; BLATZ, J. ; BOYSEN, D. – **Processos de mistura na mineração e na siderurgia**. XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 18 a 21 de Setembro de 2007, Salvador – Bahia, Brasil. Vol.: 1 – Págs.: 367 à 382.

VARNBÜLER, C. B. ; LEMPERLE, M. ; RACHNER, H. J. - **Recuperação do ferro residual um um forno cubilô tipo OxiCup**. Revista Fundição e Serviços - Jan. 2007, pg. 94

VENTURA, A. M. F. M. - **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Revista Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n.º 3/4, 2009

VIEIRA, A. T O. ; NASCIMENTO, F. A. S. ; ECHTERNACHT, J. H. ; OLIVEIRA, J. R.; BENTES, M. A. – **Produção de carga metálica a partir de pelotas auto-redutoras em máquina de sinter piloto**. XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VIII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM. 18 a 21 de setembro de 2007. Salvador - Bahia, Brasil. Págs.: 383 à 392

VIEIRA, A. C. - **A indústria do aço no Brasil e no mundo**. Instituto Aço Brasil, 2013

ZAFRA, A. S. ; CASTELLANOS, G. E. G. - **Estudio de viabilidad sobre la aglomeracion de finos de carbon**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander , Facultad de Ingenierías Fisico Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Bucaramanga - 2004