

# PROJETO ESSIDER – ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DAS INFORMAÇÕES TABULADAS NO COMITÊ TÉCNICO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO EM ALTOS-FORNOS<sup>1</sup>

*José Henrique Noldin Júnior<sup>2</sup>*

*José Carlos D'Abreu<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Por iniciativa da ABM e recomendado pela Secretaria de Tecnologia Industrial do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), o projeto Essider foi elaborado e coordenado pela PUC-Rio e a ABM, tendo envolvido no seu desenvolvimento mais de 100 especialistas, entre dirigentes e técnicos das siderúrgicas brasileiras, professores e pesquisadores de universidades e centros de pesquisa, consultores independentes, o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) e a equipe executiva do projeto. Foram realizados diagnósticos de desempenho e das tecnologias siderúrgicas, resultantes da análise crítica de uma série de indicadores conceituados e formulados em base de cálculo comum e comparados posteriormente a dados de usinas do exterior. Neste trabalho são apresentados e discutidos os principais resultados do Comitê Técnico 3 de redução de minério em altos-fornos.

**Palavras-chave:** Altos-fornos; Projeto Essider; Indicadores; Siderurgia brasileira.

## **ESSIDER PROJECT – ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF THE DATA COMPILED IN THE TECHNICAL GROUP OF IRON ORE REDUCTION IN BLAST FURNACES**

### **Resumo**

Initially suggested by ABM and recommended by the Secretariat of Industrial Technology of the Ministry of Development, Industry and External Commerce (MDIC), the ESSIDER project was elaborated and coordinated by PUC-Rio and ABM, involving more than 100 experts, among technical and organizational representatives of the Brazilian steel companies, researchers and professors of different universities and research centers, independent consultants, the Brazilian Steel Institute (IBS) and the project executive team. The main purpose of this project was to carry out a complete diagnosis of the operational performance and of the technologies used in the steel production chain in Brazil. This diagnosis was performed using a series of indicators carefully conceived and formulated in a common basis with the results later compared with the references abroad. In this work the main results achieved by the Technical Group 3 (reduction of iron ore in blast furnaces) are presented and discussed.

**Key words:** Blast furnaces; Essider; Indicators; Brazilian steel industry.

1 *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

2 *Membro da ABM. Tecno-Logos Desenvolvimento Tecnológico S/A*  
<jose.noldin@tecnologossa.com.br>

3 *Membro da ABM. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.*  
<dabreu@dcmm.puc-rio.br>

## 1 INTRODUÇÃO

O projeto Essider (Estudo Setorial da Siderurgia Brasileira) foi concebido para levantar, apresentar e discutir os principais indicadores de desempenho das etapas operacionais que constituem a cadeia produtiva da siderurgia integrada.<sup>(1)</sup>

O estudo foi iniciado em meados de 2006 e o relatório final foi concluído em julho de 2009. Nestes três anos de projeto foram identificados fatores com potencial para manter e incrementar a competitividade do setor, nas diferentes áreas avaliadas.

Adotou-se a seguinte metodologia para o estudo:

- conceituação dos principais indicadores de cada um dos setores analisados;
- levantamento junto às empresas siderúrgicas das informações técnicas necessárias para a análise de cada setor; e
- análise crítica, tabulações e elaboração de diagnósticos setoriais, visando identificar as ações necessárias para garantir a competitividade da siderurgia brasileira.

Para melhor encaminhar os trabalhos, foram formados ao todo 6 comitês técnicos (CTs). Aqui neste artigo são apresentados e discutidos os indicadores levantados no âmbito do CT-3 (Redução de Minério em Alto-Forno) para os altos-fornos a coque, ainda que o setor de produção de gusa via mini altos-fornos a carvão vegetal também tenha sido estudado no CT-3.

## 2 COMITÊ TÉCNICO 3: REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

O comitê técnico 3 (CT-3) dedicou-se aos aspectos de tecnologia e desempenho da redução de minério em altos-fornos. Participaram ao todo 19 altos-fornos da siderurgia integrada, sendo 14 a coque e 5 a carvão vegetal.

### 2.1 Especificação dos Produtos do Alto-Forno

#### 2.1.1 Especificação do gusa

Tabela 1– Especificação do gusa

Parâmetros	ALTOS-FORNOS A COQUE			Relação MÁX:mín
	Mínimo	MÁXIMO	Média	
Teor Fe, %	93,90	94,60	<b>94,34</b>	1,01
Teor C, %	4,30	4,90	<b>4,56</b>	1,14
Teor Mn, %	0,30	0,60	<b>0,49</b>	2,00
Teor Si, %	0,30	0,60	<b>0,42</b>	2,00
Teor S, %	0,02	0,04	<b>0,029</b>	2,00
Teor P, %	0,03	0,10	<b>0,090</b>	<b>3,33</b>
Temperatura Gusa (°C)	1.473	1.504	<b>1.492</b>	1,02

Apesar de os valores acima estarem em conformidade com boas práticas operacionais e utilização de matérias-primas de qualidade, foi levantado o fato de que a qualidade dos minérios de ferro e carvões tem mostrado tendência de degradação de sua qualidade, especialmente química. Com isso é esperado que principalmente os teores de enxofre (S) e fósforo (P) no gusa apresentem tendência de crescimento no futuro, isto em função do aumento do teor destes elementos no carvão e minério, respectivamente, exigindo adaptações nas rotinas operacionais

e/ou equipamentos das aciarias ou ainda introdução de pré-tratamentos de gusa para correção e ajuste *downstream* dos teores desses elementos.

Ainda, na especificação dos produtos dos Altos-Fornos, outro comentário refere-se à busca por elevadas taxas de injeção (PCI) com tendência de maiores teores de silício (Si) e enxofre (S) no gusa. O teor de fósforo (P) pode ou não ser alterado, dependendo do teor deste elemento no coque, no carvão a ser injetado e da taxa de substituição resultante.

## 2.1.2 Especificação da escória

**Tabela 2** – Especificação da escória

<b>Composto</b>	<b>Faixa Benchmarking</b>	<b>Média ESSIDER</b>
SiO <sub>2</sub>	30% a 40%	34,8%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5% a 15%	12,3%
CaO	35% a 45%	42,6%
MgO	5% a 15%	6,6%
<b>SOMA</b>	<b>95% a 97%</b>	<b>96,3%</b>

Pela Tabela 2 nota-se que os teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e MgO informados pelas empresas no CT-3 do Essider, encontram-se adequados e em conformidade com o *benchmarking* mundial.

A soma dos teores dos compostos acima confirma os dados da literatura de que em escórias de Altos-Fornos a coque com boa qualidade o valor de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + MgO, deve ser da ordem de 96%.

Além disso, a escória deve conter teores baixos de óxido de ferro (FeO), normalmente menores que 1,0%, fato confirmado pelos valores tabulados no Essider, sugerindo a ausência de problemas operacionais sérios como arriamentos crônicos de carga, queda na temperatura do gusa, etc.

Por fim, vale o comentário de que a escória de altos-fornos é na atualidade facilmente comercializável junto à indústria de cimento. O uso de escória de alto-forno em substituição ao *clinker* para fabricação de cimento é praticado mundialmente, dando origem a cimentos de alta qualidade e baixo custo. Do ponto de vista técnico-econômico, estima-se que a escória possa substituir entre 60% e 70% dos componentes mais caros utilizados na fabricação de cimento. Já do ponto de vista ambiental, cada tonelada de escória de alto-forno utilizada na fabricação de cimento implica que aproximadamente uma tonelada de CO<sub>2</sub> deixa de ser emitida para a atmosfera.

## 2.2 Especificações Típicas dos Insumos do AF

### 2.2.1 Cargas Ferríferas

A proximidade entre os valores mínimo e máximo mostrados na tabela acima indicam que os sinteres utilizados pelas siderúrgicas nacionais são muito parecidos, com bom controle da sua qualidade química e por consequência de suas propriedades metalúrgicas. Além disso, os valores apresentados sugerem que as empresas têm um bom controle das matérias-primas assim como do próprio processo de sinterização.

**Tabela 3 – Qualidade química típica do sinter**

Parâmetros	mínimo	MÁXIMO	Média
Fe <sub>Total</sub>	57,30%	58,33%	<b>58,05%</b>
FeO	5,50%	7,10%	<b>6,41%</b>
SiO <sub>2</sub>	4,90%	5,34%	<b>5,02%</b>
CaO	8,60%	10,00%	<b>9,20%</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,06%	1,31%	<b>1,15%</b>
P	0,030%	0,050%	<b>0,044%</b>
MgO	0,940%	1,720%	<b>1,355%</b>
Mn	0,440%	0,600%	<b>0,510%</b>
Basicidade (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,68	2,01	<b>1,84</b>

**Tabela 4 – Qualidade química típica do granulado**

Parâmetros	mínimo	MÁXIMO	Média	Granulado setor guseiro
Fe <sub>Total</sub>	63,60%	66,61%	<b>65,00%</b>	<b>65,00%</b>
SiO <sub>2</sub>	2,11%	4,44%	<b>3,24%</b>	<b>3,30%</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74%	1,67%	<b>1,21%</b>	<b>1,43%</b>
P	0,040%	0,060%	<b>0,056%</b>	<b>0,065%</b>
Mn	0,060%	0,340%	<b>0,157%</b>	<b>2,15%</b>
PPC (perda por calcinação)	1,53%	2,45%	<b>1,89%</b>	

A Tabela 4 confirma um dado já bastante conhecido que é a qualidade química do minério granulado brasileiro, sem dúvida um fator positivo de competitividade das usinas nacionais, ainda que a oferta de granulado esteja em vias de exaustão, segundo especialistas.

Com relação as pelotas, estas respondem atualmente no Brasil por cerca de 12% da composição da carga dos altos-fornos, frente à 20% do material granulado (*lump*). Cabe observar que em condições de mercado aquecido e com crescente escassez de oferta de material granulado, espera-se uma tendência de aumento na utilização das pelotas nos altos-fornos. Elas se configuram como uma alternativa ao granulado, com as seguintes vantagens operacionais:

- permitem maior índice de produtividade;
- ensejam menor *fuel-rate* com conseqüente menor emissão de CO<sub>2</sub>;
- promovem menor volume de escória;
- geram menor quantidade de finos que o granulado; e
- possibilitam maior controle da qualidade química e metalúrgica da carga.

### 2.2.2 Cargas de carbono

De uma geral, a operação ótima dos altos-fornos buscando alta produtividade, baixo consumo energético e longevidade de campanha está diretamente ligada à utilização de matérias-primas de qualidade adequada, entre elas o coque.

Se comparado com as especificações de CSR e CRI recomendadas na literatura para operação otimizada do alto forno ( indicadas abaixo ), o coque utilizado pelas usinas brasileiras apresenta as seguintes características:

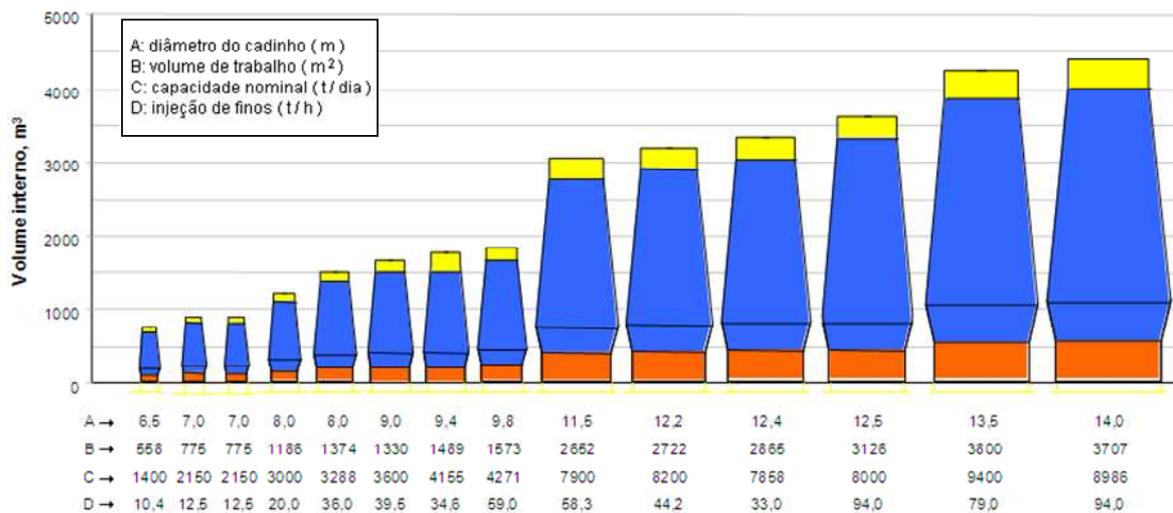
- CSR ( > 65% ): Observa-se que apenas o coque comprado apresentou valor médio ligeiramente menor do que o recomendado, podendo entretanto ser considerado satisfatório; e
- CRI ( < 24% ): Recomenda-se atenção com o coque adquirido, já que o valor máximo está sensivelmente acima do valor mínimo recomendado.

**Tabela 5– Coque.**

ÍTEMS	COQUE PRÓPRIO (%)			COQUE ADQUIRIDO (%)		
	mínimo	MÁXIMO	Média	mínimo	MÁXIMO	Média
Carbono Fixo	87,50	89,06	<b>88,27</b>	86,00	88,89	<b>87,48</b>
Cinzas	9,90	11,50	<b>10,53</b>	10,00	12,50	<b>11,24</b>
Enxofre	0,600	0,630	<b>0,611</b>	0,570	0,700	<b>0,62</b>
Umidade	0,24	4,80	<b>2,34</b>	4,80	8,00	<b>5,53</b>
CRI	20,50	24,38	<b>22,28</b>	22,00	27,91	<b>24,97</b>
CSR	65,00	71,00	<b>67,65</b>	62,00	72,00	<b>64,97</b>
D.I. (150/15) (>25mm)	83,00	86,30	<b>84,65</b>	84,17	85,50	<b>84,93</b>
Tamanho médio, mm	48,20	53,00	<b>50,88</b>	—	—	—

Conforme mencionado anteriormente, um dos principais fatores competitivos da siderurgia brasileira é sem dúvida a certeza do acesso a minérios de ferro de qualidade. Todavia, em direção oposta encontra-se o acesso às unidades de carbono (coque, carvão coqueificável e carvão de PCI ), hoje praticamente 100% sendo importado, o que caracteriza uma dependência plena e, por consequência, um fator de vulnerabilidade do setor.

### 2.3 Especificação dos Altos-fornos



**Figura 1 – Especificação dos altos-fornos considerados no CT-3 do Essider.**

A Figura 1 mostra os fornos estudados no CT-3 do projeto Essider. Nota-se que o alto-forno, assim como qualquer outro reator químico, apresenta relação entre as suas dimensões principais, ou seja, suas características geométricas. Por exemplo, o volume de trabalho, diâmetro do cadinho e produção diária apresentam clara correlação, conforme mostrado na Figura 2.

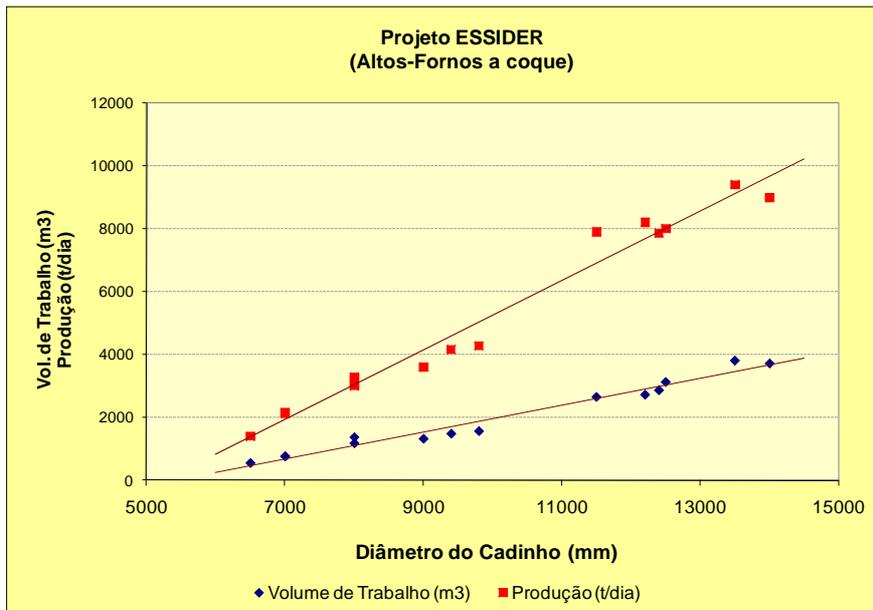


Figura 2 – Especificação dos altos-fornos avaliados no CT-3 do Essider.

O relatório final do projeto apresenta tabelas detalhadas mostrando as características dos altos-fornos brasileiros a coque. Obviamente que a relação entre as dimensões (alturas, volumes, ângulos etc.) muda de forno para forno, mas nenhum reator brasileiro chama a atenção por apresentar variações significativas de projeto dimensional.

## 2.4 Produtividade dos Altos-fornos a Coque

A Figura 3 seguir mostra os dados coletados referentes à Produtividade Volumétrica ( $t \times m^{-3} VT \times dia^{-1}$ ) dos altos-fornos brasileiros, comparando-os com algumas referências estrangeiras.

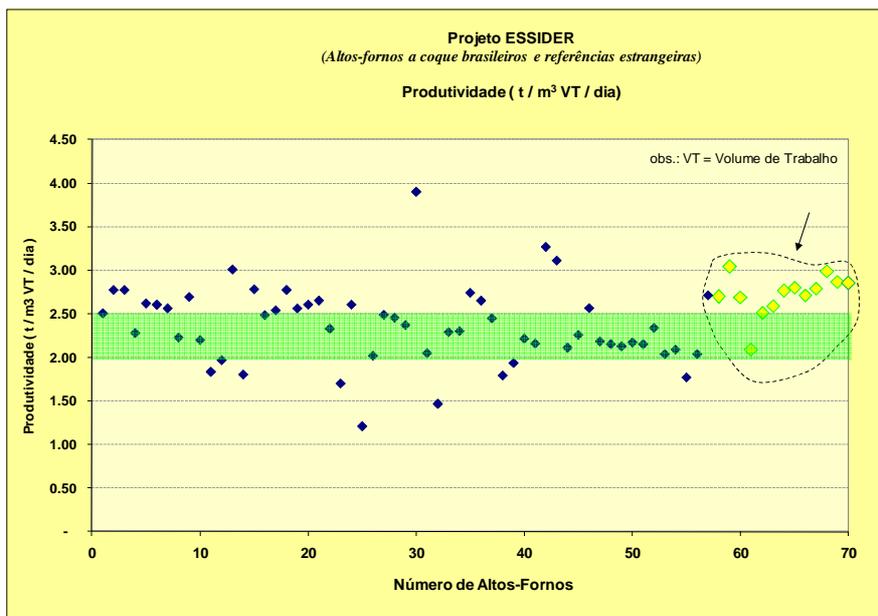


Figura 3 – Produtividade dos altos-fornos avaliados no CT-3 do Essider.

Os dados apresentados anteriormente comprovam que os altos-fornos a coque brasileiros operam com valores acima da faixa média mundial, que se encontra entre 2,0 e 2,5 t x m<sup>-3</sup> VT x dia<sup>-1</sup> (faixa horizontal escurecida do gráfico anterior). Ressalta-se que existem casos de altos-fornos no exterior operando com produtividade volumétrica sensivelmente acima dos altos-fornos brasileiros, como por exemplo, o alto-forno 6 da Corus em IJmuiden (Holanda) e da AK Steel em Middletown (Estados Unidos) que, segundo dados da literatura operam com índices de produtividade da ordem de 3,30 e 4,17 t x m<sup>-3</sup> VT x dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

Logicamente devem ser analisadas as razões para estas altas taxas de produtividade, principalmente o tipo de carga utilizada e o *fuel-rate* da operação. Especificamente para os dois casos citados, o alto-forno da Corus opera com altos índices de PCI (muitas vezes próximos a 240 kg/ t<sub>gusa</sub>) e um criterioso controle das matérias-primas. No caso do alto-forno da AK Steel a operação inclui, além de altas taxas de injeção de gás natural, uma sensível metalização da carga através da utilização de mais de 200 kg/t<sub>gusa</sub> de HBI (*hot briquetted iron*) e sucata na carga.

Sem discutir os méritos, vantagens e desvantagens de cada caso, o fato é que, se necessário, existem performances de altos-fornos no exterior que demonstram a viabilidade do aumento da produtividade volumétrica dos altos-fornos brasileiros além dos valores atuais. Claro que para cada caso deverá ser considerada uma análise dos vários aspectos técnicos, logísticos, econômicos e ambientais envolvidos, antes de se determinar a aplicabilidade de cada técnica.

## 2.5 Produção dos Altos-fornos

**Tabela 6** – Produção de gusa nos altos-fornos brasileiros a coque

<b>PRODUÇÃO GUSA (altos-fornos a coque)</b>			
<b>DISCRIMINAÇÃO</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Capacidade instalada, mil t	22 968	22 968	25 768
Produção, mil t	22 731	21 410	23 840
<b>Utilização da capacidade instalada, %</b>	<b>99%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>

*Obs. 1: 2006 houve a paralisação do alto-forno da CSN; Obs. 2: A Capacidade Instalada em 2007 aumentou com a entrada em operação dos Altos-Fornos da Arcelor Mittal – Tubarão e Juiz de Fora; Obs. 3: Na capacidade instalada não estão considerados os altos-fornos da Açominas (1,5 Mt/ano) e da CSA (5,3 Mt/ano).*

Os dados indicaram inicialmente que o parque industrial de altos-fornos brasileiros estava funcionando em 2006 e 2007 abaixo da sua capacidade total instalada (nominal). Todavia, se for considerada a capacidade disponível real ao invés da instalada teórica, ou seja, descontando a parada do AF da CSN em 2006 e considerando o novo AF da Arcelor Mittal – Tubarão somente após *start-up*, conclui-se que a utilização real encontrava-se no limite da capacidade.

## 2.6 Consumos Específicos na Produção de Gusa

### 2.6.1 Cargas ferríferas

De acordo com os dados pesquisados no Essdier, a participação do sinter na carga dos altos-fornos a coque no Brasil varia desde um mínimo de 60% até um valor máximo de 85%, enquanto no exterior a média é de 68,4%, com mínimo de 17,5% e máximo de 93,6%.

Todavia, recomenda-se cautela na análise dos dados das usinas internacionais, pois a utilização de sinter, pelota e lump varia muito de região para região. Nos Estados Unidos, por exemplo, o principal constituinte da carga ferrosa dos altos-fornos é a pelota, que responde por cerca de 86% do total, enquanto o sinter responde por menos que 10% da carga.

Aqui se reforça o fato de que a qualidade do minério brasileiro, portanto da carga ferrosa dos altos-fornos brasileiros, é um dos principais fatores diferenciais de competitividade.

### Composição da carga ferrosa dos Altos-fornos

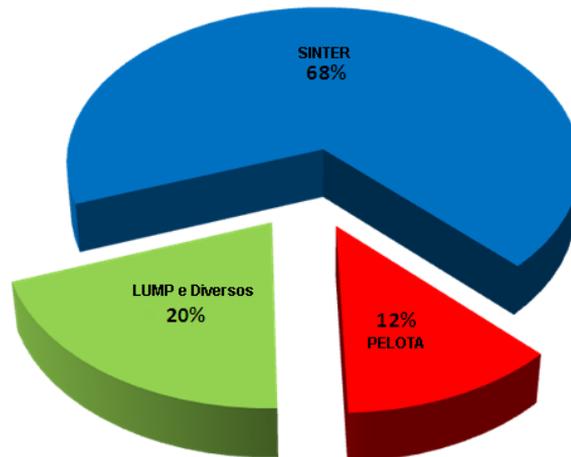


Figura 4 – Mix da carga ferrífera nos altos-fornos brasileiros.

### 2.6.2 Combustível – redutor

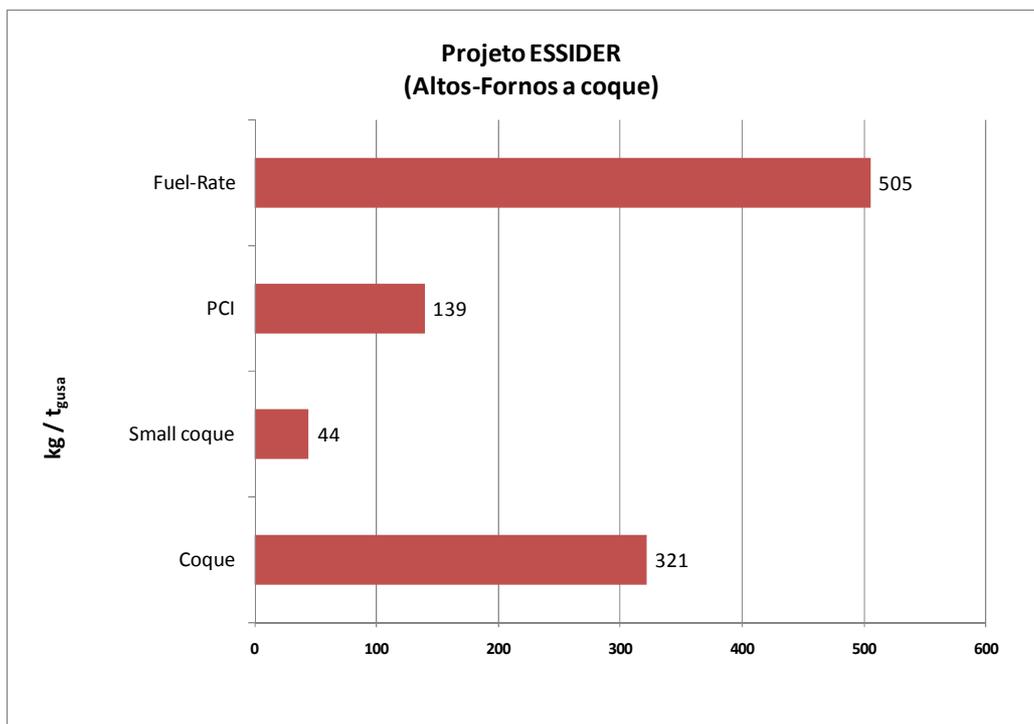


Figura 5 – Consumo médio de combustível nos altos-fornos considerados.

Analisando-se os dados (PCI + Small coque + Coque), nota-se que tais valores estão de acordo com algumas das melhores práticas do setor, a nível mundial.

Ressalta-se que nos últimos anos, apesar do *fuel-rate* médio praticado no mundo ter se mantido praticamente constante, o consumo de coque vem sendo reduzido significativamente, devido a otimizações de equipamento, práticas operacionais e principalmente, pelas maiores taxas de injeção de combustíveis auxiliares. O Brasil vem seguindo esta tendência.

Estima-se que grandes reduções futuras no *fuel-rate* são improváveis, portanto as empresas deverão focar seus esforços futuros em outras frentes, como por exemplo achar maneiras de reduzir as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> para atmosfera.

Especificamente com relação ao uso de combustíveis auxiliares injetados pelas ventaneiras, os dados apresentados mostraram que a média brasileira é de 139 kg/t<sub>gusa</sub>, enquanto a média mundial é da ordem de 112 kg/t<sub>gusa</sub> (dados de 2004). Dados de literatura mostram que a maior taxa de PCI praticada por uma usina brasileira corresponde a 190 kg/t<sub>gusa</sub>, enquanto a menor taxa é da ordem de 110 kg/t<sub>gusa</sub>.

Esses números mostram uma boa performance do setor, apesar de que há possibilidades para melhorias. Para efeito de comparação, dados da literatura mostram que algumas usinas no exterior operam com taxas superiores a 200 kg/t<sub>gusa</sub> como média anual. É o caso da Corus na Holanda (233 kg/t<sub>gusa</sub>), Baosteel da China (230 kg/t<sub>gusa</sub>) e Sidmar da Bélgica (211 kg/t<sub>gusa</sub>), sendo o recorde da Fukuyama no Japão, que alcançou injeção da ordem de 260 kg/t<sub>gusa</sub>.

Com o intuito de melhorar a utilização de combustíveis auxiliares injetados pelas ventaneiras, sugere-se a realização de estudos sobre os fenômenos envolvendo as cinzas dos materiais injetados, necessidade de inovações nos projetos de lança, efeito da matéria volátil (tipo e quantidade) sobre a eficiência de queima, enfim, aprofundar o entendimento do impacto resultante de altas taxas de injeção na região do cadinho. *Todavia, ressalta-se que o aumento da quantidade de material injetado deve preconizar sempre uma alta taxa de substituição, ou seja, o “fuel-rate” não deve aumentar com o aumento da injeção.*

O principal combustível auxiliar utilizado no Brasil é o carvão mineral, apesar de que algumas usinas brasileiras também praticam a injeção de gás natural e de coque de petróleo pelas ventaneiras.

Cabe ressaltar algumas experiências de empresas no exterior que atualmente praticam a injeção de combustíveis não convencionais pelas ventaneiras, tal como gás de coqueria ou mesmo pneus e plásticos, que tem indubitavelmente um forte apelo ambiental e devem ser considerados no futuro. Experiências piloto, injetando gás de topo reformado pelas ventaneiras, também tem sido conduzidas ultimamente. Usinas que apresentam baixos valores de consumo de coque, muitas vezes da ordem de 270 kg/t<sub>gusa</sub> a 290 kg/t<sub>gusa</sub>, apresentam altas taxas de PCI, passando do nível de 200 kg/t<sub>gusa</sub>.

Com relação ao uso de *small* coque, ainda existem grandes oportunidades para melhoria de utilização deste recurso, de certa maneira novo no setor. Operações *benchmarking* mostram utilização de *small* coque da ordem de 90 kg/t<sub>gusa</sub>, com um consumo de coque total da ordem de 220 kg/t<sub>gusa</sub>.

### 3 CONCLUSÕES

- A análise das informações tabuladas a partir do questionário formulado no âmbito do CT-3 do projeto Essider, forneceu um excelente “Raio-X” da situação atual da operação dos altos-fornos brasileiros a coque.
- A análise dos dados tabulados no âmbito do CT-3 do projeto Essider, identificou várias oportunidades de ações envolvendo P, D, E & I (Pesquisa, Desenvolvimento, Engenharia e Inovação). Os detalhes destas oportunidades estão mostrados no relatório final do projeto.
- Nos últimos anos, em todas as partes do mundo, a operação dos altos-fornos melhorou muito em termos técnicos, econômicos e ambientais. Estima-se que os índices de produtividade cresceram cerca de 35% em apenas 15 anos, o percentual de resíduos não recicláveis reduziu drasticamente (2 a 3% do total de resíduos) e o consumo energético está próximo do mínimo teórico de  $9.8 \text{ GJ/t}_{\text{gusa}}^{(2)}$
- Considerando-se os valores de *benchmarking* mundial, pode-se afirmar que a siderurgia brasileira já ocupa lugar de destaque, embora exista margem para melhorias futuras.
- Estima-se que as iniciativas atuais das siderúrgicas, fornecedores de tecnologia e academia levarão os altos-fornos a operarem no futuro, segundo as seguintes características principais:
  - *Fuel-Rate* < 480 kg/  $t_{\text{gusa}}$
  - Consumo de coque < 270 kg/  $t_{\text{gusa}}$
  - Injeção de carvão (PCI) > 240 kg/  $t_{\text{gusa}}$
  - Injeção de gás natural > 150 kg/  $t_{\text{gusa}}$
  - Temperatura do ar > 1.200°C
  - Oxigênio no ar de sopro > 35%
  - Produtividade volumétrica = 3,5 a 4,0  $t \times m^{-3}VT \times \text{dia}^{-1}$
  - Acompanhamento contínuo da evolução do desgaste real do revestimento refratário, especialmente do cadinho, via controle de processo
  - Uso de tecnologias de melhor “convivência” com minérios portadores de teores mais elevados de fósforo, sílica e alumina (estas tecnologias devem ser objeto de P & D).
  - Menores emissões líquidas de  $\text{CO}_2$  (< 1  $t_{\text{CO}_2}/t_{\text{gusa}}$ )
  - Reciclagem completa dos resíduos gerados
  - Baixa utilização de água
  - Uso eficiente da energia química e calor sensível do gás de alto-forno
  - Esforço em pesquisa básica focada na exploração das etapas controladoras do processo de redução dos óxidos de ferro
  - Uso de minérios mais finos, através de técnicas de micro-aglomeração

### REFERÊNCIAS

- 1 D'Abreu, J. C. Estudo Setorial da Siderurgia, 1ª ed., Rio de Janeiro, Lucky editora. 218 p.
- 2 Fruehan, R. J.; et al. Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions. US-DOE. 2000.