

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

“UTILIZAÇÃO DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO SOB A FORMA DE *SMALL*
NO ALTO-FORNO”

Autor: Adriano Cesar Carvalhido

Orientador: Dr. Maurício Covcevich Bagatini

Novembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
Mestrado Profissional

Adriano Cesar Carvalhido

“UTILIZAÇÃO DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO SOB A FORMA DE *SMALL*
NO ALTO-FORNO”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

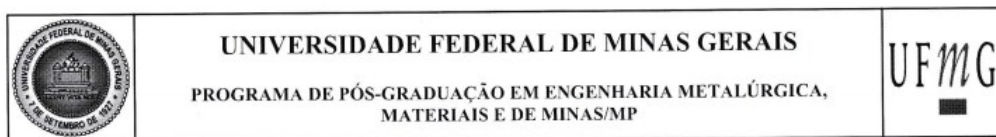
Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Dr. Maurício Covcevich Bagatini

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2019

C331u	<p>Carvalho, Adriano Cesar. Utilização do coque verde de petróleo sob a forma de <i>small</i> no alto-forno [recurso eletrônico] / Adriano Cesar Carvalho. – 2019. 1 recurso online (xii, 33 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Maurício Covcevich Bagatini.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexo: f. 31.</p> <p>Bibliografia: f. 32-33.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Coque de petróleo - Teses. 4. Altos-fornos - Teses. I. Bagatini, Maurício Covcevich. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU:669(043)</p>
-------	--



**ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO
ADRIANO CÉSAR CARVALHIDO**

Realizou-se, no dia 22 de novembro de 2019, às 09:00 horas, 2240, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada "*UTILIZAÇÃO DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO SOB A FORMA DE SMALL NO ALTO-FORNO*", apresentada por ADRIANO CÉSAR CARVALHIDO, número de registro 2017720709, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Maurício Bagatini - Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Leandro Rocha Lemos (UFMG), Prof(a). Ismael Vemdrame Flores (Universidade federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

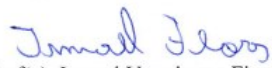
Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 22 de novembro de 2019.


Prof(a). Maurício Bagatini (Doutor)


Prof(a). Leandro Rocha Lemos (Doutor)


Prof(a). Ismael Vemdrame Flores (Doutor)

Dedicatória

À minha amada esposa, Raquel,
e aos meus filhos Gabriela e Danilo.

“A ciência consiste em substituir o saber que parecia seguro por uma teoria, ou seja, por algo problemático”.

(José Ortega y Gasset)

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho, e em particular:

Ao Prof. Dr. Maurício Covceвич Bagatini, meu orientador, pelos conselhos, motivação e atenção a mim dedicada.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro, meu primeiro orientador, por acreditar e apoiar o pré-projeto apresentado.

Aos meus familiares em particular minha esposa Raquel, meus filhos Gabriela e Danilo, meus pais Condé (*in memorian*) e Antônia, meus Irmãos Júnior e Carlos Augusto e minhas Tias Ilda, Sônia e Bahia.

Agradeço à Usiminas, por meio da Gerência Geral de Redução, pela oportunidade de realizar este trabalho, acreditando que o conhecimento é um dos pilares para o sucesso e desenvolvimento da empresa.

À UFMG, por parte do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pelo conhecimento transmitido e recursos que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

Às pesquisadoras Beatriz Fausta Gandra e Larissa Rodrigues de Carvalho Rocha por todo o suporte e conhecimento compartilhado.

Aos amigos da Gerência Técnica de Redução, pelos estudos, companheirismo, apoio e incentivo durante a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE NOTAÇÕES	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	7
2.1. Geral.....	7
2.2. Específicos	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1. Matérias-primas	8
3.2. Metodologia	8
3.2.1. Caracterização das matérias-primas.....	8
3.2.2. Avaliação da permeabilidade em leito granulado.....	10
3.2.3. Ensaio a alta temperatura	14
3.2.4. Teste industrial.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1. Características das matérias-primas.....	17
4.2. Ensaio de permeabilidade em escala piloto.....	21
4.3. Resultado dos ensaios em A&F	22
4.4. Teste industrial.....	25
5. CONCLUSÕES	29
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	30
7. APÊNDICES	31
8. REFERÊNCIAS.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação esquemática do alto-forno.....	2
Figura 1.2 – Representação do efeito do <i>small coke</i> na carga metálica [3].....	2
Figura 1.3 – Microestrutura do sinter reduzido por 120 min a 1250°C [5].....	3
Figura 1.4 – Efeito da proporção de coque misturado à carga metálica na permeabilidade do gás em regiões de alta temperatura [6].....	4
Figura 1.5 – Diagrama de RIST combinado com o diagrama de equilíbrio Baur-Glaessner e a reação de Boudouard P= 0,1 MPa [8].	5
Figura 1.6 – Taxa de <i>small</i> na Europa, USA e Usiminas Ipatinga, 2013 [9].....	6
Figura 3.1 – Fotografia do CVP após recebimento no pátio da Usiminas.....	8
Figura 3.2 – Simulador de Perda de Carga em Alto-Forno.	12
Figura 3.3 – Detalhes do equipamento usado no ensaio de amolecimento e fusão.....	14
Figura 3.4 – Representação esquemática do cadinho para teste em A&F.....	15
Figura 3.5 – Relação entre os parâmetros de amolecimento e fusão e os fenômenos internos do alto-forno.....	16
Figura 3.6 – Planejamento do teste industrial no alto-forno.....	17
Figura 4.1 – Análise química dos combustíveis.	18
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica dos materiais.....	19
Figura 4.3 – Resultados de resistência à permeabilidade em leitos avaliados individualmente.	21
Figura 4.4 – Resultados de resistência à permeabilidade leitos avaliados em combinações binárias.....	22
Figura 4.5 – Grau de redução <i>versus</i> temperatura início amolecimento para as cargas analisadas.	23
Figura 4.6 – Resultados em A&F para as cargas analisadas.	24
Figura 4.7 – Parâmetros operacionais no período de teste.	25
Figura 4.8 – Fotomicrografia do pó de balão no período de teste.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Condições dos leitos para os ensaios de permeabilidade.....	13
Tabela IV.1 – Análise química do sínter industrial.	17
Tabela IV.2 – Resultados em DRX nos combustíveis (%).	19
Tabela IV.3 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados nos materiais.	20
Tabela IV.4 – Resultados de CRI e CSR dos combustíveis.	20
Tabela IV.5 – Resultados dos ensaios em A&F realizados no sínter individual e com adição de combustível sob a forma de <i>small</i>	23

LISTA DE NOTAÇÕES

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

A&F – Amolecimento e Fusão

CSR – *coke strength after reaction*

CRI – *coke reactivity index*

CVP – coque verde de petróleo

DRX – difração de raios-X

EU – União Européia

ISO – *International Organization for Standardization*

JIS – *Japanese Industrial Standards*

PER – peso específico real

RDI – *Reduction Disintegration Index*

RI – *Reducibility Index*

SI – *Shatter Index*

USA – Estados Unidos da América

RESUMO

Uma das formas de se tentar minimizar o impacto do custo de produção de gusa é o uso adequado do *small coke*, considerando, evidentemente, o equilíbrio entre geração e consumo de cada usina siderúrgica. Ao ser distribuído junto à carga metálica, este material funciona como fonte de regeneração do gás, melhorando a redução do óxido de ferro. No entanto, o mecanismo de atuação do *small coke* não está bem definido, fato que ainda limita seu uso industrialmente. Na Usiminas, o equilíbrio na geração e no consumo desse material limita o seu uso em taxas abaixo da média nacional, que se encontra na faixa de 45 kg/t. Nesse sentido, foi avaliado o efeito do coque verde de petróleo (CVP) em substituição ao *small coke* no consumo de combustível e na estabilidade operacional do alto-forno. Os resultados obtidos a partir de testes industriais indicaram a possibilidade de substituição de até 45 kg/t gusa, com manutenção do *fuel rate*, da permeabilidade e da produtividade do alto-forno.

Palavras-chave: Alto-Forno; CVP, *Small*.

ABSTRACT

One of the ways to try to minimize the impact of the hot metal producing cost is the proper use of small coke, considering, of course, the balance between generation and consumption of each industry. When distributed into the metallic charge, this material acts as a source of gas regeneration, improving the reduction of iron oxide. However, its mechanism is not well defined, a fact that still limits its use industrially. At Usiminas, the balance between generation and consumption of this material limits its use at rates below the national average, actually in 45 kg/t. Therefore, it was evaluated the effect of pet coke to replace small coke in fuel consumption and blast furnace operational stability. The industrial test results indicated the possibility of replacement up to 45 kg/t hot metal, with fuel rate maintenance, burden permeability and blast furnace productivity.

Keywords: Blast Furnace; Pet Coke; Small.

1. INTRODUÇÃO

O propósito do alto-forno é reduzir quimicamente e converter fisicamente o óxido de ferro em gusa líquido. Ele é operado continuamente baseado no princípio de fluxo em contracorrente. No topo são carregados o coque e a carga metálica (sínter, pelota e granulado) em diferentes camadas (Figura 1.1), que descem por gravidade até a região inferior do forno (cadinho) onde se tornam o produto final (gusa) e escória. Dependendo das condições da carga e das características operacionais do reator, este processo requer de cinco a sete horas [1].

A qualidade do coque impacta fortemente na estabilidade da marcha do alto-forno, afetando diretamente a permeabilidade do leito da carga aos gases e líquidos, podendo contribuir para a produtividade e consumo total de redutores. Além disso, ao longo das últimas décadas, o coque tem se tornado o componente de maior impacto no custo final de produção de ferro-gusa nas usinas integradas [2].

Uma das formas de se tentar minimizar o impacto do custo é o uso adequado do *small coke* (Figura 1.2), considerando, evidentemente, o equilíbrio de cada usina siderúrgica. Ao ser distribuído junto à carga metálica, este material funciona como fonte de regeneração do gás, melhorando a redução do óxido de ferro. Todavia, para uso do *small coke* deve ser considerada a possibilidade de sua interferência na permeabilidade da carga do forno e prever ações corretivas, tais como: (i) ajuste na distribuição de carga; (ii) alteração na base de coque; e, (iii) posicionamento adequado do *small coke* dentro da sequência de descarga dos materiais.

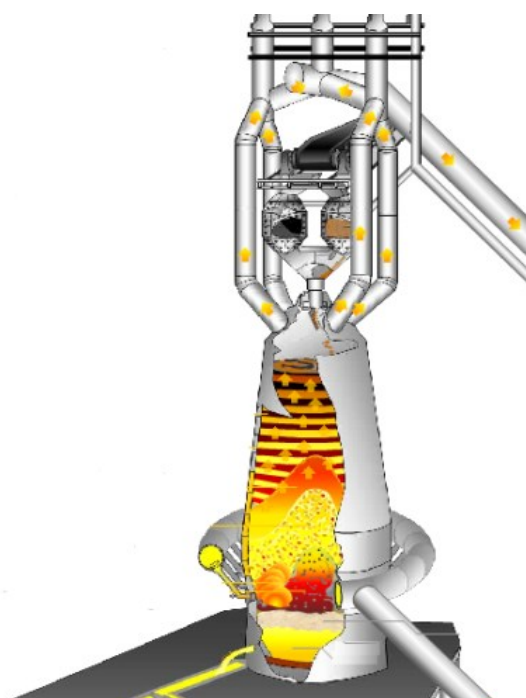


Figura 1.1 – Representação esquemática do alto-forno.

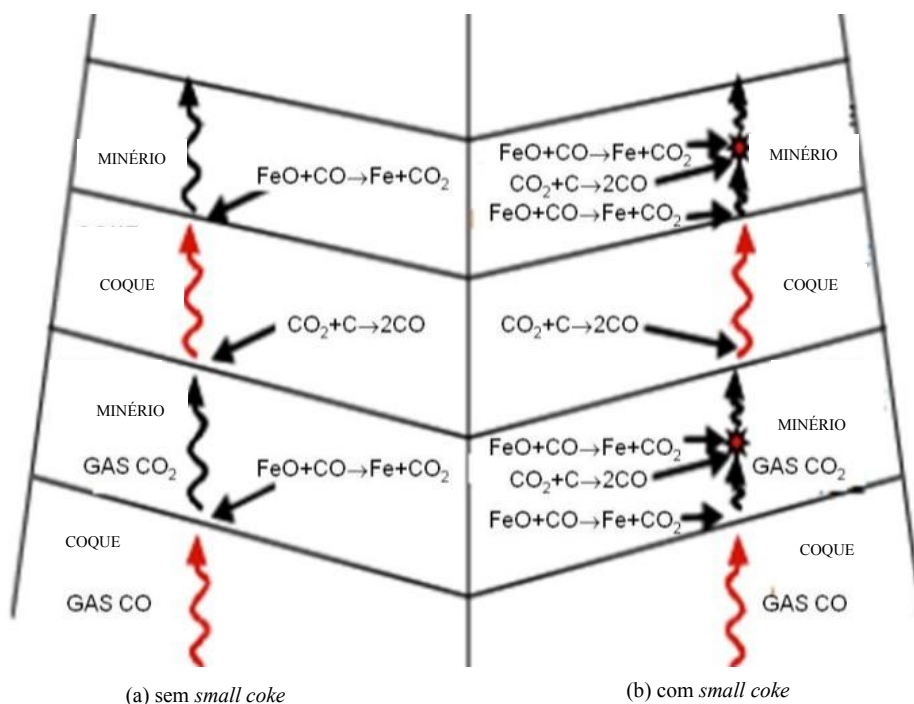


Figura 1.2 – Representação do efeito do *small coke* na carga metálica [3].

Segundo Song [4] a mistura de coque na camada de carga metálica é uma maneira econômica de utilização do coque. Condição esta que afeta o comportamento de amolecimento e fusão, a cinética de redução e a permeabilidade do leito. No entanto, o

mecanismo de atuação do *small coke* não está bem definido, fato que ainda limita seu uso industrialmente.

Desde 2007 a ArcelorMittal Monlevade [2] vem utilizando altas taxas de *small* em seu processo, cuja estabilidade no alto-forno foi alcançada, em grande parte, devido a seguinte filosofia de distribuição de carga: (i) mínimo de 40 % de coque no material próximo à parede; (ii) mínimo de 70 % de coque no material do centro da carga; e, (iii) mínimo de 75 kg/tgusa de *small coke rate*. Além disso, o controle da malha de peneiramento de coque é de fundamental importância para o balanço de coque na usina e para o processo.

Com a alta participação de *small coke* na carga, pode-se dizer que o coque do centro é mais preservado no interior do forno, garantindo assim, uma adequada permeabilidade da coluna de carga, refletindo em redução do *coke rate* e aumento de produtividade [2].

Na Figura 1.3 é apresentada a microestrutura do sinter após processo de redução, com e sem a participação de *small* a 1250°C por 2 h, em ensaio desenvolvido pela Universidade de Aachen, Alemanha [5]. Pode-se ver a formação de densa camada de ferro metálico em torno dos óxidos de ferro na condição sem *small* (Figura 1.3 (a)). Por outro lado, grãos de ferro metálico são distribuídos em toda a estrutura da matriz na condição de redução com participação de *small* (Figura 1.3 (b)).

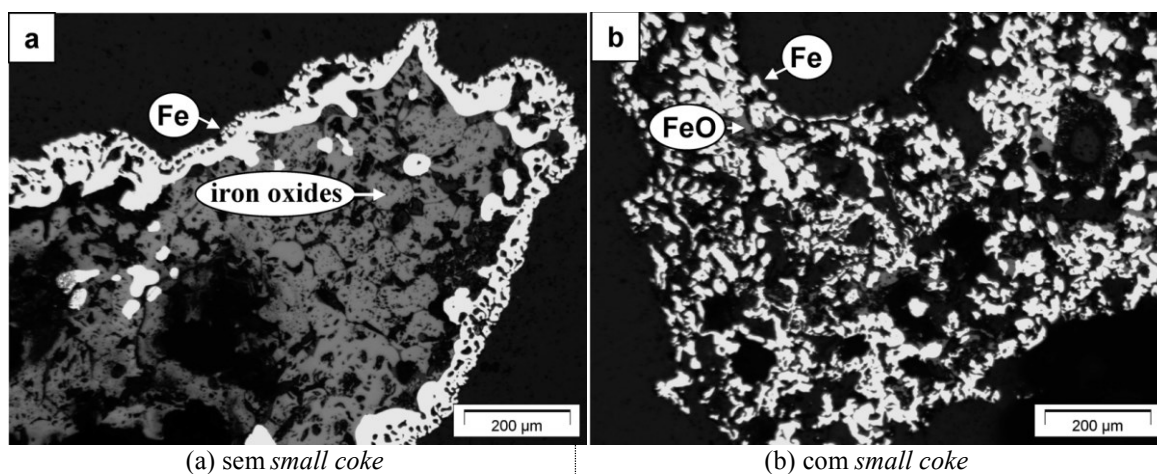


Figura 1.3 – Microestrutura do sinter reduzido por 120 min a 1250°C [5].

Estudos citados em Watakabe *et al.*[6], indicam melhoria das propriedades metalúrgicas da carga metálica, com conseqüente maior estabilidade da operação dos altos-fornos e redução no consumo de combustível quando se utiliza *small coke*. A perda máxima de pressão é consideravelmente menor com o uso de coque misturado à carga e diminui com o aumento da taxa de *small coke*, Figura 1.4 (a). Os efeitos do coque e da razão de sinter na pressão máxima são apresentados na Figura 1.4 (b). Em todas as faixas, a queda de pressão é menor quando se tem aumento do uso de *small coke* na carga metálica. Entretanto, é necessária a avaliação do uso deste material, com foco na manutenção da permeabilidade ao gás, além de possível segregação durante o carregamento no alto-forno, devido às diferenças no diâmetro e na densidade do minério e do coque, o que pode alterar o ângulo de repouso e dificultar o controle da distribuição de carga.

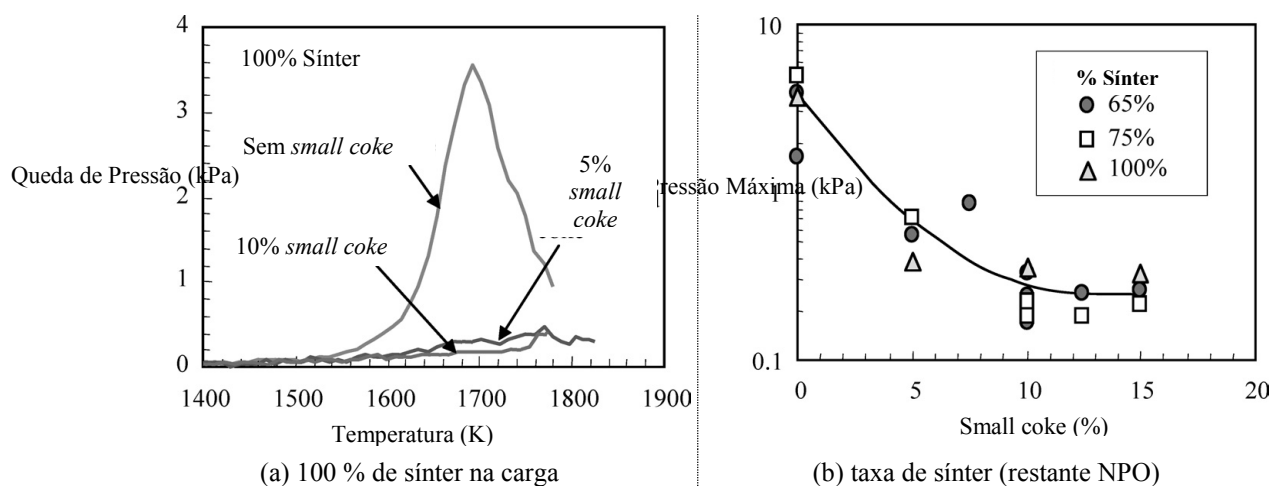


Figura 1.4 – Efeito da proporção de coque misturado à carga metálica na permeabilidade do gás em regiões de alta temperatura [6].

Tem-se discutido de maneira intensa a possibilidade de diminuição do consumo de carbono no alto-forno pela alteração no ponto de equilíbrio para a transição FeO-Fe (W para W' , Figura 1.5) afetando a redução da temperatura da zona de reserva térmica.

A ideia está derivada do diagrama de RIST indicando que uma redução na temperatura de equilíbrio entre o gás redutor e a wustita poderia alterar a composição do gás redutor de maneira a se obter menor CO e maior teor de CO₂. Isto aumentaria a eficiência de utilização do gás, resultando em menor consumo de agente redutor [8]. Uma maneira de

se obter essa situação seria com o uso de combustível mais reativo, que levou a estudos para avaliar inclusive o efeito do char e da cinza do carvão no comportamento do coque.

Sabe-se que a adição de coque com menor granulometria, o *small coke*, misturado à carga metálica, contribui para menor temperatura da zona de reserva térmica (ZRT) e boas propriedades em amolecimento e fusão da carga [7]. A utilização do *small coke*, em substituição ao coque, é uma prática comum nos altos-fornos ao redor do mundo, podendo variar entre 10 kg/t a 100 kg/t de gusa [7].

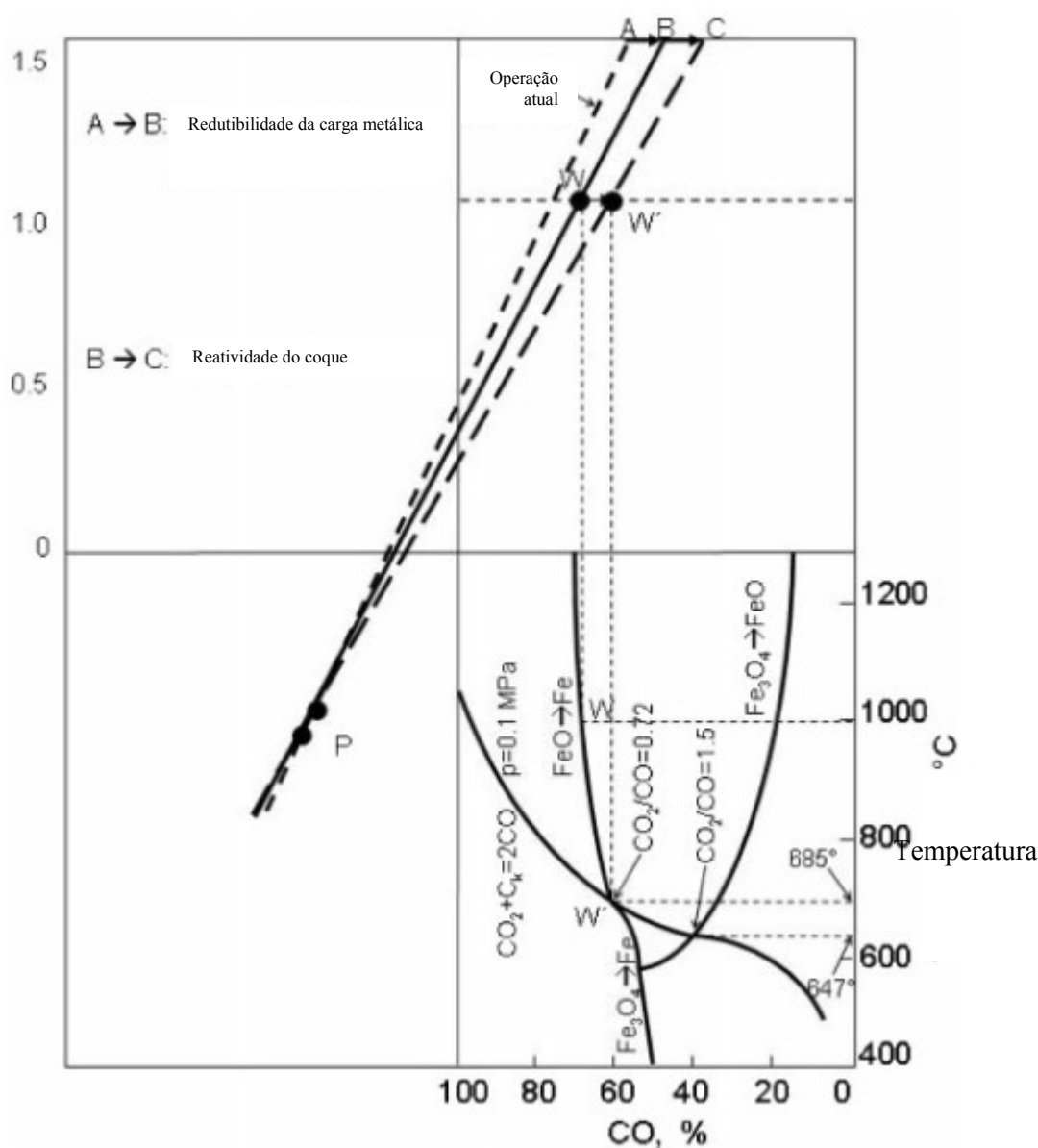


Figura 1.5 – Diagrama de RIST combinado com o diagrama de equilíbrio Baur-Glaessner e a reação de Boudouard $P=0,1 \text{ MPa}$ [8].

Na Figura 1.6 é apresentado um levantamento da quantidade de *small* utilizada em fornos europeus (EU) e norte-americanos (USA) no ano de 2013. Cada ponto indicado no gráfico reflete o resultado de um alto-forno em particular. Pode ser observado que altos-fornos que utilizam maior quantidade de *small* na carga tendem a trabalhar com menor consumo de coque (*coke rate*). Em destaque, dados dos três altos-fornos da Usiminas Ipatinga [9].

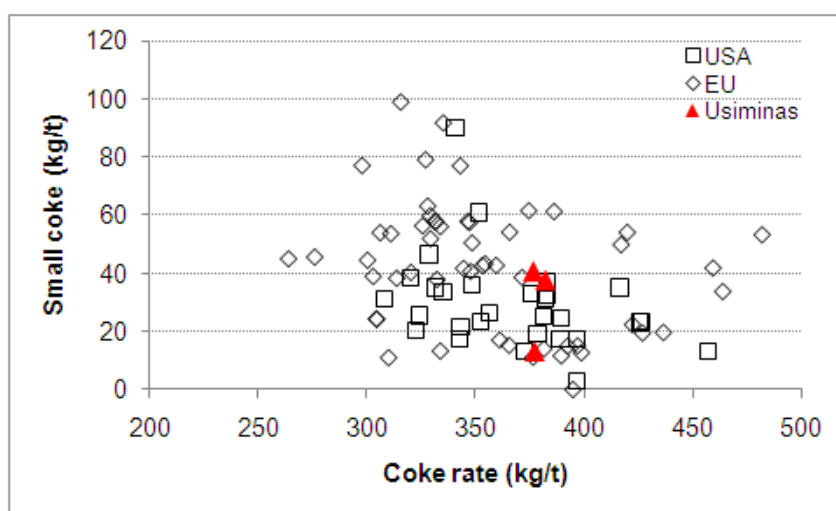


Figura 1.6 – Taxa de *small* na Europa, USA e Usiminas Ipatinga, 2013 [9].

Na Usiminas, o consumo de *small coke* poderia ser mais explorado, entretanto, o equilíbrio na geração e no consumo desse material tem sido um fator limitante para elevar o seu uso nos altos-fornos. Foi identificado por meio de ensaios de caracterização e comportamento à alta temperatura de diferentes combustíveis, o potencial uso do coque verde de petróleo (CVP) como combustível na forma de *small* [9]. Em função de suas características em termos de gaseificação, estudos indicaram a viabilidade deste tipo de material como redutor, inclusive em materiais autorredutores [10] e [11]. Assim, buscou-se nesse estudo avaliar o efeito do CVP em substituição ao *small coke* no consumo de combustível e na estabilidade operacional do alto-forno.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito do CVP em substituição ao *small coke* no consumo de combustível e na estabilidade operacional do alto-forno.

2.2. Específicos

- Caracterizar quimicamente o CVP;
- Avaliar a permeabilidade da carga composta por sinter na condição com e sem *small coke*;
- Avaliar os parâmetros de um alto-forno em escala industrial com e sem CVP como *small* na carga, a saber: Produção (t); *Fuel rate* (kg/t); *Coke rate* (kg/t); Rendimento de CO (%); Carbono *solution loss* (kg/t); Índice de resistência à permeabilidade (-); Temperatura do gusa (°C); Silício no gusa (%) e Temperatura do topo (°C).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Matérias-primas

Como carga metálica padrão, foi utilizado o sinter industrial. Como combustíveis sob a forma de *small* foram utilizados o coque e o CVP. Na Figura 3.1 é apresentada a imagem do CVP após seu recebimento na Usiminas.



Figura 3.1 – Fotografia do CVP após recebimento no pátio da Usiminas.

3.2. Metodologia

A metodologia aplicada consistiu em quatro etapas:

- (i) caracterização das matérias-primas;
- (ii) avaliação da permeabilidade em leito granulado;
- (iii) ensaios a alta temperatura;
- (iv) teste industrial.

3.2.1. Caracterização das matérias-primas

3.2.1.1 Caracterização do sinter

O sinter industrial teve seus teores de ferro total e de óxido de ferro II (FeO) determinados por volumetria por ataque e titulados com dicromato de potássio. Os compostos SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO , foram analisados via espectrometria por fluorescência de raio-X no espectrômetro da marca Siemens SRS 3000.

Para determinação da granulometria, os ensaios foram processados a seco e executados por meio de conjuntos de peneiras com malhas de 5 mm, 15 mm, 25 mm e 50 mm, conforme padrão utilizado industrialmente.

O peso específico real (PER) foi realizado por meio de picnometria a hélio por meio do equipamento modelo *Ultrapyc 1200e* da Quantachrome Instruments. Para tanto, a amostra de sínter foi reduzida a $100\% < 0,150\text{mm}$.

A sua caracterização mineralógica foi realizada por meio da difração de raios-X. As amostras para a difratometria foram pulverizadas até ficarem totalmente menores que 0,074mm. O difratômetro usado é do fabricante Bruker modelo D8 Advance, configuração 2θ (amostra fixa) com anodo de Cobalto, com tempo de leitura em 1 segundo no intervalo angular de $0,02^\circ$. A quantificação das fases cristalinas por *Rietveld* (utilizada para indicar a distribuição das fases ferrosas presentes no sínter) é fundamentada no método dos mínimos quadrados, sendo o refinamento conduzido pela minimização da soma do passo angular do padrão de difração.

Em termos de resistência mecânica do sínter foram realizados os ensaios de *shatter test* (JIS M 8711) [12] e *tumbler test* (ISO 3271) [13]. O primeiro consiste em submeter a amostra ao esforço de impacto e o segundo ao impacto e a abrasão. Após os testes o material passa por classificação granulométrica e os resultados são apresentados pela porcentagem retida em 10 mm.

Os ensaios metalúrgicos foram realizados conforme procedimentos do Laboratório de Redução. O ensaio de RDI (*Reduction Degradation Index*) mede a degradação granulométrica do material durante sua redução, avaliado por meio do material retido na malha de 6,35 mm e passante nas peneiras de 3,15 mm e 0,50 mm (baseado na norma ISO 4696-1 [14]). A granulometria do ensaio para o sínter é na faixa entre 10,0 mm e 12,5 mm. O RI (*Reducibility Index*), baseado na norma ISO 7215 [15], é uma medida da facilidade da saída de oxigênio combinado com o ferro por meio da redução indireta, em tempo e temperatura fixos. O ensaio é realizado com o sínter na granulometria entre 18 mm e 20 mm.

3.2.1.2 Caracterização dos combustíveis

Para os combustíveis (coque e CVP), foi realizada a análise imediata (umidade, cinza e matéria volátil), análise elementar (C, H, O, N e S) e composição química das cinzas. O oxigênio foi obtido por diferença.

Para determinação da granulometria, os ensaios foram processados a seco e executados por meio de conjuntos de peneiras com malhas de 5 mm, 15 mm, 25 mm e 50 mm.

Em equipamentos e condições similares àquelas descritas para o sínter, foi realizada a caracterização mineralógica por meio da difração de raios-X, visando identificar as principais diferenças intrínsecas entre os combustíveis. Também foi obtido o peso específico real (PER) por meio de picnometria a hélio, com amostra na granulometria $100\% < 0,150\text{mm}$.

No intuito de medir a resistência física a frio dos combustíveis na forma de *small* foi realizado um ensaio de *shatter test* (JIS M 8711) [12] nesses materiais. Os resultados foram expressos pela porcentagem de material $> 10\text{ mm}$ remanescente após degradação.

Foram realizados os ensaios de qualidade CRI/CSR, índice de reatividade do coque e índice de resistência após reação, respectivamente, ASTM D5341 / D5341M [15]. Neste ensaio, uma retorta com 200g de amostra de combustível (granulometria de 19mm a 21mm) é colocada em um forno a 1100°C, por 150 minutos (30 minutos de N₂ e 120 minutos de CO₂). Após este tempo a amostra é resfriada com N₂, pesada, e a diferença de peso (percentual) gera o índice CRI. Em seguida, a amostra é colocada em um tambor e sofre 600 revoluções (por 30 minutos), sendo peneirada na malha de 9,52mm, gerando o índice CSR.

3.2.2 Avaliação da permeabilidade em leito granulado

Para medir a permeabilidade da carga foram realizados ensaios em escala piloto no equipamento Simulador de Perda de Carga em Alto-Forno, no qual são feitas simulações da carga formada pelas matérias-primas utilizadas no alto-forno.

O equipamento é composto por um cilindro com 130 mm de diâmetro interno e 1791 mm de altura útil, onde as matérias-primas são carregadas pelo topo e submetidas à passagem de um fluxo gasoso controlado (N_2) (Figura 3.2).

O monitoramento de pressão foi realizado por meio de um manômetro de tubo em “U”, em dois pontos distanciados em 1805 mm, equivalentes às pressões de base e de topo, implementado no equipamento por proporcionar melhor repetibilidade na leitura dos resultados durante os testes de validação. O resultado da variação de pressão Delta P (ΔP) é dado em mmca.

O ajuste da vazão do gás (gás inerte (N_2) ou ar comprimido) foi feito por meio de uma válvula globo, enquanto a leitura dessa vazão foi realizada por um rotâmetro com escala entre $20Nm^3/h$ e $200Nm^3/h$.

Os valores absolutos do ΔP não podem ser comparados com aqueles reais dos altos-fornos. Isto porque existem aspectos no processo que não são considerados em escala piloto tais como: a presença das reações de redução em elevadas temperaturas, degradação da carga no interior dos altos-fornos, composição da carga metálica e combustíveis, distribuição de carga, altura da zona granular e interferências da zona coesiva. Sendo assim, o parâmetro de referência utilizado para comparação é a velocidade a vazão do gás. A velocidade a vazão seria a velocidade do gás se toda a seção transversal do leito estivesse disponível para seu escoamento.

Os ensaios foram realizados a frio, em leitos fixos e em condições previamente determinadas, de acordo com o procedimento padrão para execução desses ensaios, visando garantir a padronização e a confiabilidade dos resultados.

O carregamento é realizado pela parte superior do simulador, já tendo homogeneizado previamente o sinter e o combustível sob a forma de *small*.

Na parte inferior do cilindro foi utilizada uma tela (grelha) com malha de 5mm, cuja função foi fornecer suporte para carga e contribuir para a distribuição regular do fluxo de gás.

Conhecendo as vazões do gás, a sua velocidade a vazio V_0 (m/s) pode ser obtida pela Equação (1). Nesta equação, Q é a vazão do gás (Nm^3/h) e A é a área da seção transversal do cilindro (m^2). O ΔP obtido no ensaio é dado em mmca de acordo com a Equação (2), em que $P(\text{base})$ e $P(\text{topo})$ são, respectivamente, as pressões de base e de topo do leito.

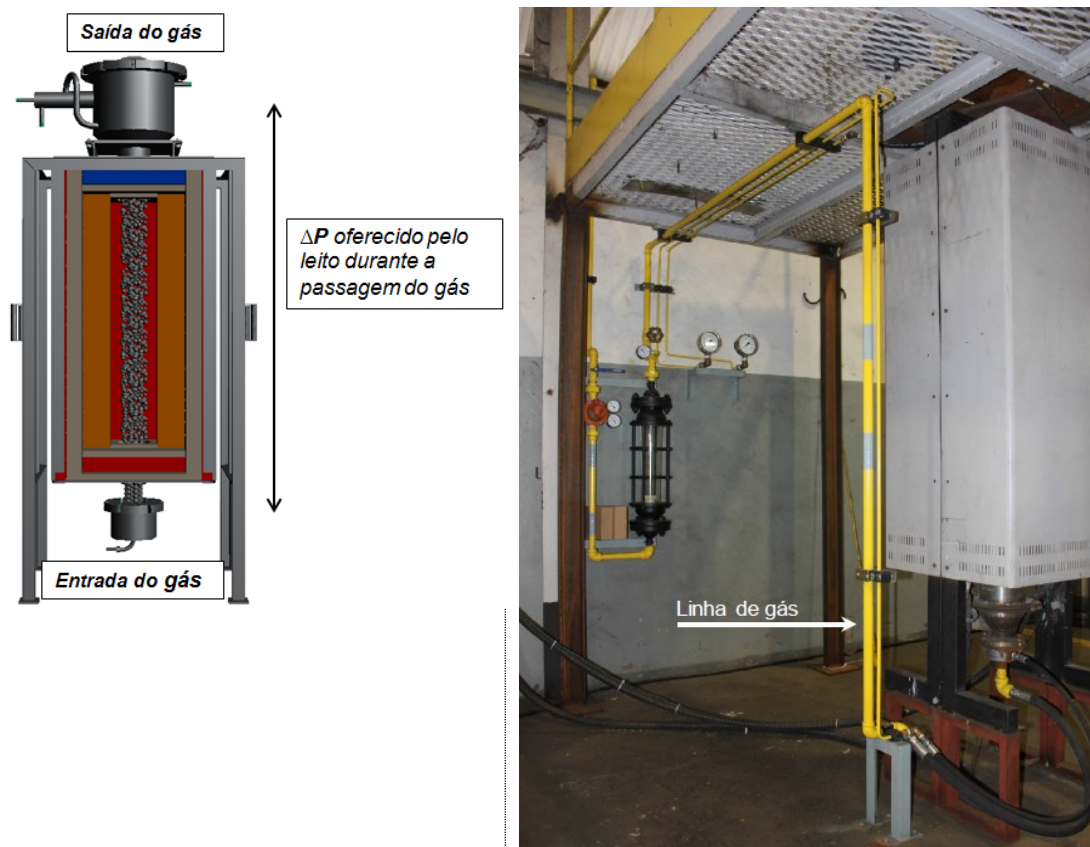


Figura 3.2 – Simulador de Perda de Carga em Alto-Forno.

$$V_0 = \frac{Q}{(A \cdot 3600)} \quad (1)$$

$$\Delta P = P(\text{base}) - P(\text{topo}) \quad (2)$$

Cada vazão inserida no ensaio corresponde a uma velocidade a vazio e gera um resultado de perda de carga (ΔP). Foram utilizadas vazões entre $24 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e $66 \text{ Nm}^3/\text{h}$, com as velocidades a vazio correspondentes de $0,5 \text{ m/s}$ a $1,4 \text{ m/s}$. Como referência, as velocidades a vazio aproximadas praticadas nos Altos-Fornos 1 e 2 e no Alto-Forno 3 da Usiminas são, respectivamente, $0,6 \text{ m/s}$ e $1,0 \text{ m/s}$.

O resultado gerado nos ensaios de permeabilidade é uma correlação entre a velocidade a vazio do gás e a perda de carga gerada (ΔP) pela passagem desse gás pelo leito, em que quanto maior o ΔP , pior é a permeabilidade do leito.

Os testes de permeabilidade foram realizados com o sinter industrial, o *small coke* e o *small CVP*. As matérias-primas foram avaliadas conforme apresentado na Tabela III.1: (i) leitos formados pelas matérias-primas individualmente, contemplando apenas a faixa granulométrica predominante de cada material, e (ii) leitos em combinações binárias, variando a proporção do combustível na forma de *small* no leito de sinter.

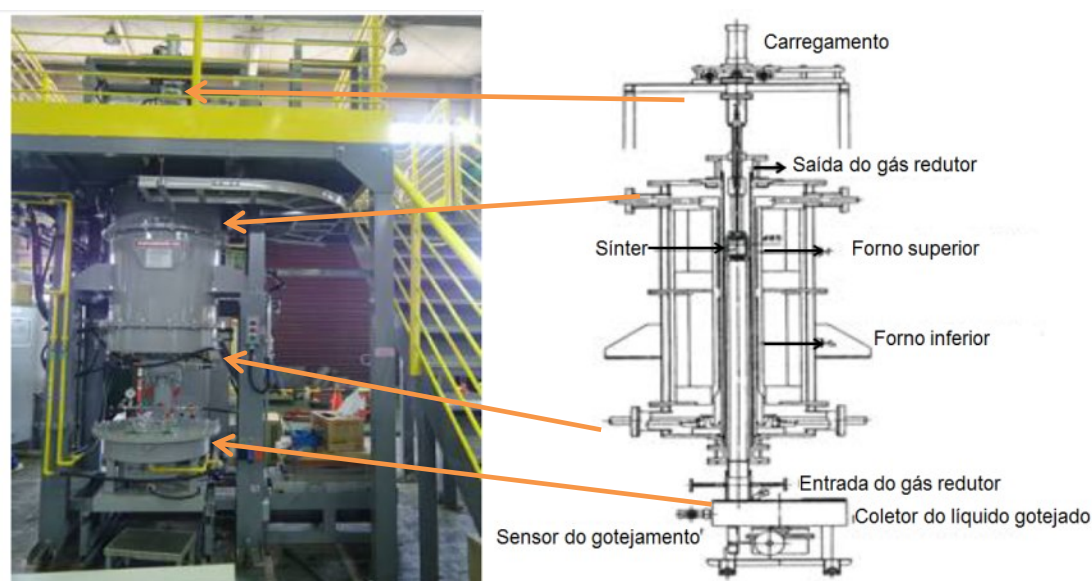
Tabela III.1 – Condições dos leitos para os ensaios de permeabilidade.

Teste	Composição do leito	Material utilizado	Faixa granulométrica (mm)	Peso da carga (kg)
01	Leitos individuais	Sinter	5 a 50	25
02		<i>small coke</i>	10 a 25	10
03		<i>Small CVP</i>	10 a 25	10
04	Leitos em combinações binárias correspondente a 75 kg <i>Small</i> /t gusa	Sinter	5 a 50	25
05		<i>small coke</i>	10 a 25	1,275
06	Leitos em combinações binárias correspondente a 55 kg <i>Small</i> /t gusa	Sinter	5 a 50	25
07		<i>Small CVP</i>	10 a 25	0,975
08	Leitos em combinações binárias correspondente a 40 kg <i>Small</i> /t gusa	Sinter	5 a 50	25
09		<i>small coke</i>	10 a 25	0,675
		<i>Small CVP</i>	10 a 25	0,675

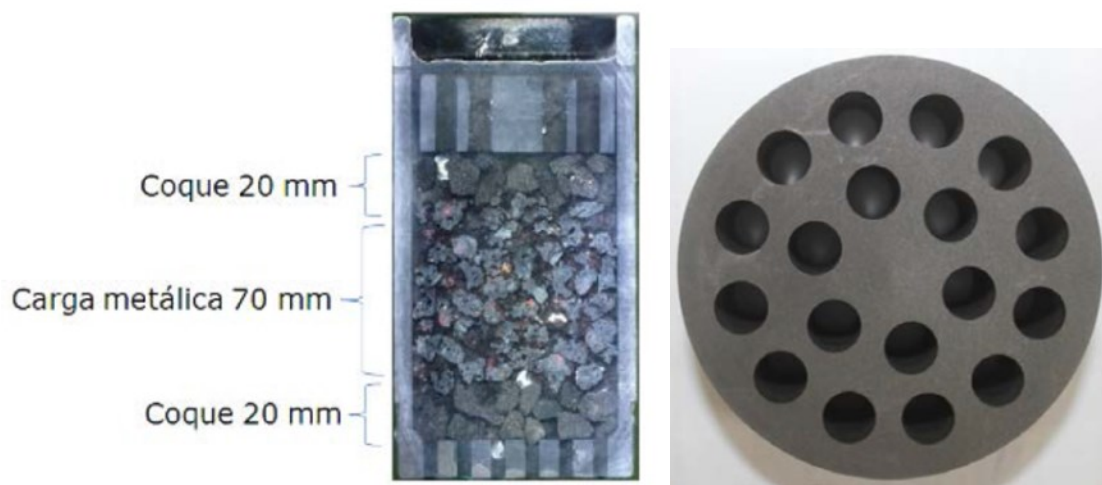
O Simulador de Perda de Carga em Alto-Forno não possibilita o controle da pressão da linha de alimentação do gás. Portanto, à medida que se realiza o acréscimo da vazão e, como consequência, a queda de pressão na linha, ocorrem limitações para continuar aumentando a quantidade de gás. Essas limitações são diretamente afetadas pela condição da pressão de base dos leitos, ou seja, se a pressão de base estiver muito elevada, não é possível realizar o acréscimo de vazão.

3.2.3 Ensaios a alta temperatura

Os ensaios a alta temperatura foram realizados no forno de amolecimento e fusão (A&F). Como não há norma para este tipo de teste, foi usado o procedimento adotado pelo Centro de Pesquisa & Desenvolvimento Usiminas. Na Figura 3.3 são mostrados detalhes do equipamento.



(a) Foto e desenho esquemático do forno amolecimento de fusão



(b) disposição da carga no cadinho

(c) grelha de grafite

Figura 3.3 – Detalhes do equipamento usado no ensaio de amolecimento e fusão.

A amostra de carga metálica é colocada entre duas camadas de coque dentro de um cadinho de grafite (85mm de diâmetro e 110mm de altura) posicionado no centro do forno. Devido a estas dimensões, em procedimento padrão de operação, as matérias-primas são preparadas numa granulometria controlada, ligeiramente inferior àquela

utilizada no alto-forno. A quantidade de carga metálica é definida pela altura da amostra dentro do cadinho, que deve ser de 70mm. As camadas inferior e superior de coque são de 20mm. O fundo do cadinho é em forma de grade o que permite o gotejamento do material líquido.

Para o presente estudo os ensaios em A&F com carga mista foram realizados com o CVP e com o coque, equivalentes ao carregamento de 25 kg/t gusa, 50 kg/t gusa e 75 kg/t gusa respectivamente para cada um dos combustíveis. O combustível sob a forma de *small* foi distribuído de maneira homogênea no meio do sínter, Figura 3.4, sendo todo o material na faixa de 10 mm a 15 mm.

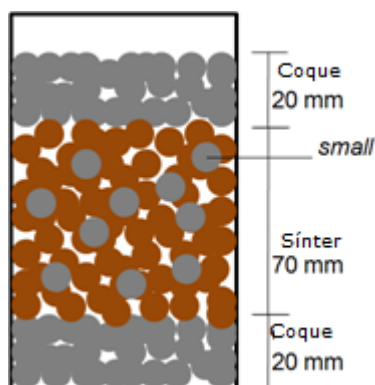


Figura 3.4 – Representação esquemática do cadinho para teste em A&F.

No ensaio amolecimento e fusão as amostras são aquecidas sob um fluxo de 34NI/min de N_2 a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. A 800°C , uma pressão de 98kPa é aplicada na amostra e se inicia a passagem do gás redutor (o fluxo continua igual a 34NI/min). A 1000°C a taxa de aquecimento do forno superior é alterada para $5^\circ\text{C}/\text{min}$ e o aquecimento prossegue até atingir 1550°C . O aquecimento do forno inferior prossegue a $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até 1650°C . Ao final do ensaio, a refrigeração do forno é controlada até 800°C , a um fluxo de N_2 igual a 15NI/min. O teste é realizado sob carga de forma a se reproduzir a resistência mecânica a que o material metálico é submetido dentro do alto-forno. Esta carga é aplicada no topo da superfície da amostra por um pistão de grafite.

Os principais parâmetros obtidos pelos ensaios de amolecimento e fusão são listados a seguir. Estes parâmetros são diretamente relacionados aos fenômenos que acontecem no interior do forno, Figura 3.5.

T_s – **temperatura de início da zona coesiva**, que corresponde ao instante em que a queda de pressão atinge 200 mmca durante o aquecimento da amostra;

T_e – **temperatura de final de fusão**, que corresponde ao instante em que a queda de pressão retorna a 200 mmca após pico de pressão;

ΔT – **estimativa da espessura da zona coesiva**, corresponde ao aumento de temperatura experimentado pela carga metálica na região de queda de pressão mais significativa do alto-forno;

ΔP_{max} – **queda máxima de pressão**, que indica a perda de carga no leito;

S – **área sob o pico de perda de pressão do gás**, que é um indicador da permeabilidade global do leito durante o ensaio; e,

R_{s200} e **R₁₂₀₀** – **grau de redução** no início do amolecimento e a 1200°C, respectivamente.

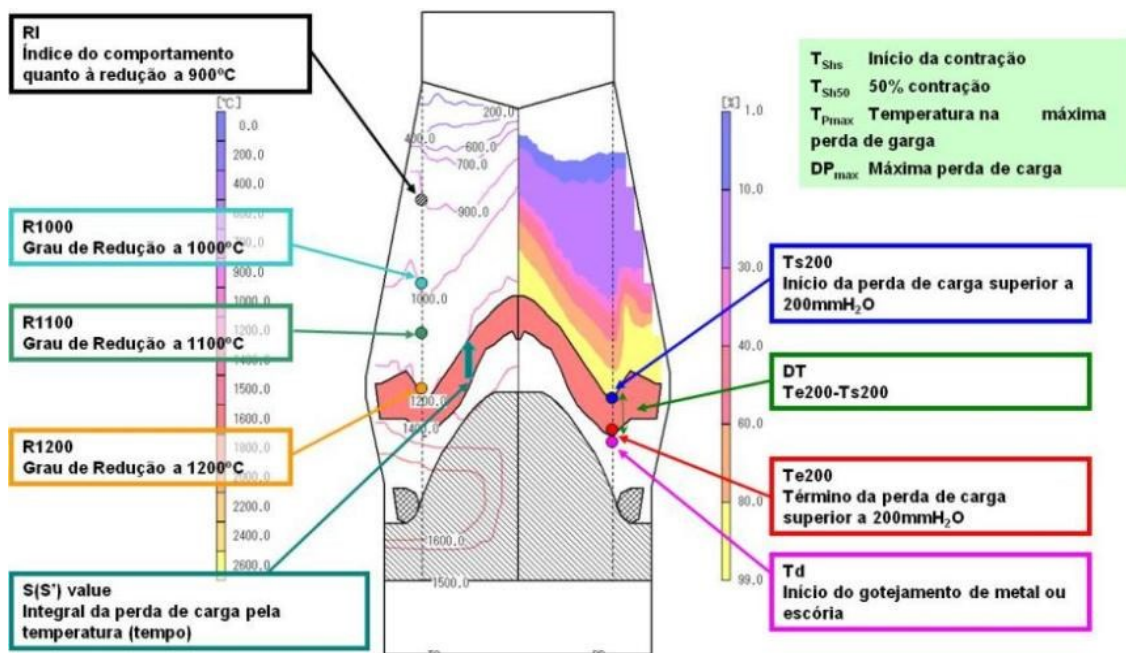


Figura 3.5 – Relação entre os parâmetros de amolecimento e fusão e os fenômenos internos do alto-forno.

3.2.4 Teste industrial

O planejamento do consumo do *small* CVP foi realizado de acordo com a quantidade de material adquirido para teste, conforme a especificação granulométrica desejada, sendo 900 t de CVP na faixa granulométrica entre 10mm e 30mm. Os testes foram realizados em três etapas, como apresentado na Figura 3.6. O teste industrial foi realizado em um alto-forno com volume interno de 885 m³, 16 ventaneiras, cadinho com diâmetro de 7m e com capacidade de produção igual a 2000t/d.

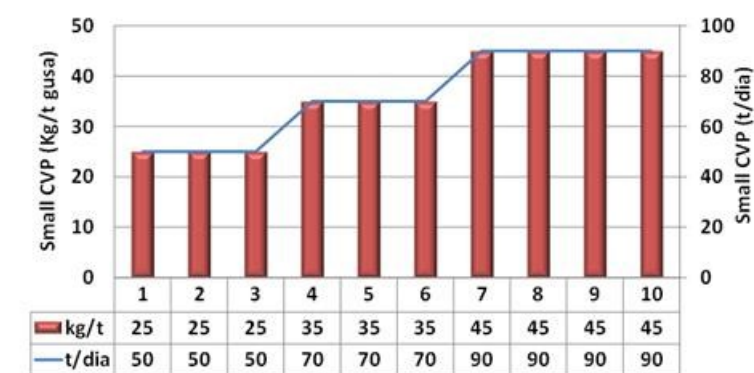


Figura 3.6 – Planejamento do teste industrial no alto-forno.

Durante o teste industrial, foram monitorados os seguintes parâmetros: Produção (t); *Fuel rate* (kg/t); *Coke rate* (kg/t); Rendimento de CO (%); Carbono *solution loss* (kg/t); Índice de resistência à permeabilidade (-); Temperatura do gusa (°C); Silício no gusa (%) e Temperatura do topo (°C).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características das matérias-primas

A composição química do sinter é apresentada na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Análise química do sinter industrial.

Composto	Fe _T	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO/SiO ₂
(%)	56,6	6,35	10,4	6,05	1,56	1,10	1,72

Pela Figura 4.1 se observa que o CVP apresentou baixo teor de cinza (0,77%) quando comparado ao coque (8,00%) utilizado. Entretanto, em função de sua maior matéria volátil (10,90%) apresenta carbono fixo (88,33%) ligeiramente inferior ao coque (91,40%).

MATERIAL: Small Coque				MATERIAL: Small CVP			
<u>ANÁLISE IMEDIATA (BASE SECA)</u>				<u>ANÁLISE IMEDIATA (BASE SECA)</u>			
Cinza			8,00	Cinza			0,77
Matéria volátil			0,60	Matéria volátil			10,90
Carbono fixo			91,40	Carbono fixo			88,33
<u>ANÁLISE ELEMENTAR (BASE SECA)</u>				<u>ANÁLISE ELEMENTAR (BASE SECA)</u>			
Carbono	88,90	Oxigênio	0,65	Carbono	90,20	Oxigênio	2,25
Hidrogênio	0,17	Nitrogênio	1,59	Hidrogênio	3,78	Nitrogênio	2,20
Enxofre	0,69			Enxofre	0,80		
<u>COMPOSIÇÃO DA CINZA</u>				<u>COMPOSIÇÃO DA CINZA</u>			
SiO ₂	43,38	MgO	5,43	SiO ₂	36,47	MgO	1,75
Al ₂ O ₃	24,50	MnO	0,10	Al ₂ O ₃	9,39	MnO	0,07
Fe ₂ O ₃	17,20	P ₂ O ₅	0,53	Fe ₂ O ₃	7,75	P ₂ O ₅	0,24
CaO	4,86	Na ₂ O	0,56	CaO	23,48	Na ₂ O	1,56
TiO ₂	1,47	K ₂ O	1,57	TiO ₂	0,36	K ₂ O	0,71
SO ₃	0,12	ZnO	0,04	SO ₃	10,00	ZnO	0,09
		V ₂ O ₅	0,24			V ₂ O ₅	4,02

Figura 4.1 – Análise química dos combustíveis.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados de análise granulométrica dos materiais.

O sinter é o material com distribuição mais ampla, com maior fração de partículas entre 10mm e 25mm, que é a faixa indicada para esta carga metálica considerando o processo de redução, contemplando uma faixa granulométrica mais extensa que as demais matérias-primas.

O *small coke* também está concentrado entre 10mm e 25mm, enquanto o *small CVP* apresentou maior participação nas faixas granulométricas menores, ou seja, mais fino que a granulometria desejada para sua utilização no teste industrial.

A diferença entre o peso específico real do sinter ($4,51 \text{ g/cm}^3$) e aquele dos combustíveis, *small coke* ($1,97 \text{ g/cm}^3$) e *small CVP* ($1,45 \text{ g/cm}^3$), indicam forte possibilidade de segregação do CVP durante carregamento no alto-forno. Entretanto, no reator escolhido para teste industrial o sistema de carregamento permite a colocação do *small* na região intermediária da carga metálica, conforme indicado para este tipo de combustível.

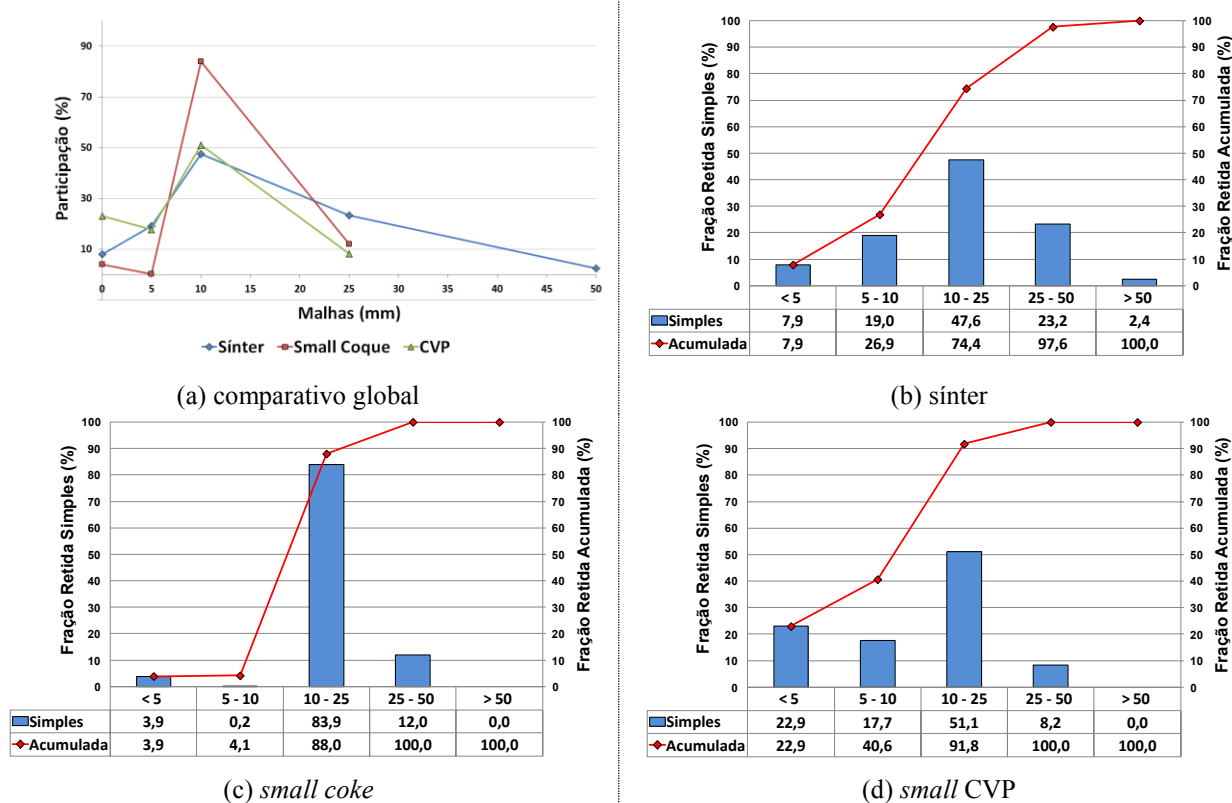


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica dos materiais.

Em DRX, método Rietveld, o sinter apresentou 25% de hematita, 32% de magnetita, 0,4% de wustita e 0,8% de quartzo, além da presença de SFCA e silicatos, que não são quantificados pela técnica. Na Tabela IV.2 são indicados os resultados da análise nos combustíveis, evidenciando a diferença intrínseca entre os materiais.

Tabela IV.2 – Resultados em DRX nos combustíveis (%).

Material	Amorfo	Cristalino	Fases cristalinas	
<i>Small coke</i>	95,48	4,52	Hematita (Fe_2O_3)	1,34
			Quartzo (SiO_2)	37,72
			Mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$)	57,89
			Calcita (CaCO_3)	3,05
<i>Small CVP</i>	91,10	8,90	Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)	1,12
			Quartzo (SiO_2)	18,83
			Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	0,72
			Calcita (CaCO_3)	79,34

O índice de redutibilidade obtido para o sinter foi 67,45%, valor considerado razoável no cenário da usina. No entanto, é sabido que este material se destaca quando submetido a temperaturas mais elevadas, em função de sua distribuição de poros e de suas fases constituintes.

Em termos de degradação sob redução o sinter apresentou 16,2% > 6,3mm e elevada geração de material menor que 3,15mm (45,6%). Entretanto, a geração de finos abaixo de 0,5mm (9,8%) foi baixa. Esta é uma característica importante na análise de carga metálica, uma vez que afeta a permeabilidade do alto-forno, especialmente da zona de granular.

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados são apresentados na Tabela IV.3. O sinter apresentou elevada resistência à abrasão/*tumbler* e moderada resistência ao impacto/*shatter*.

Para os combustíveis, o *small coke* indicou maior resistência a frio (*shatter* = 96,50%) que o *small CVP* (*shatter* = 83,80%), mas vale ressaltar que a resistência do CVP, ainda assim, se mostrou adequada para sua aplicação como combustível na forma de *small*, especialmente em altos-fornos de pequeno porte (até 1000m³ de volume interno).

Tabela IV.3 – Resultados dos ensaios mecânicos realizados nos materiais.

Ensaio	Sinter	Small coke	Small CVP
<i>Shatter</i> (%)	86,75	96,50	83,80
<i>Tumbler</i> (%)	65,83	-	-

Os resultados de reatividade (CRI) e resistência após reação (CSR) dos combustíveis são apresentados na Tabela IV.4.

Tabela IV.4 – Resultados de CRI e CSR dos combustíveis.

Ensaio	Small coke	Small CVP
CRI (%)	29,41	19,29
CSR (%)	61,05	29,48

Foi observado menor índice de reatividade (CRI = 19,29%) para o CVP quando comparado ao coque (CRI = 29,41%). Possivelmente, essa maior reatividade (CRI) do coque está associada à temperatura padrão do ensaio (1100°C), que é bem elevada. Por

outro lado, em termos de resistência após reação (CSR), o coque apresentou melhor comportamento. Este resultado reforça a necessidade do CVP ser consumido na região superior do alto-forno, já que não apresenta resistência física após reação com o CO_2 suficiente oferecer para permeabilidade à passagem de líquidos e gases na zona de elaboração.

4.2. Ensaios de permeabilidade em escala piloto

Os resultados da perda de pressão dos leitos formados pelas matérias-primas individualmente, contemplando apenas a faixa granulométrica predominante de cada material e para os leitos em combinações binárias, variando a proporção do combustível na forma de *small* no leito de sinter são apresentados na Figura 4.3. Foram destacadas as velocidades a vazio correspondentes àquelas dos Altos-Fornos 1, 2 e 3 da Usiminas.

Para combinações binárias, cujos resultados são apresentados na Figura 4.4, o acréscimo dos combustíveis na forma de *small* variou a sua proporção nos seguintes níveis: (i) 75kg *small*/t gusa; (ii) 55kg *small*/t gusa; (iii) 40kg *small*/t gusa).

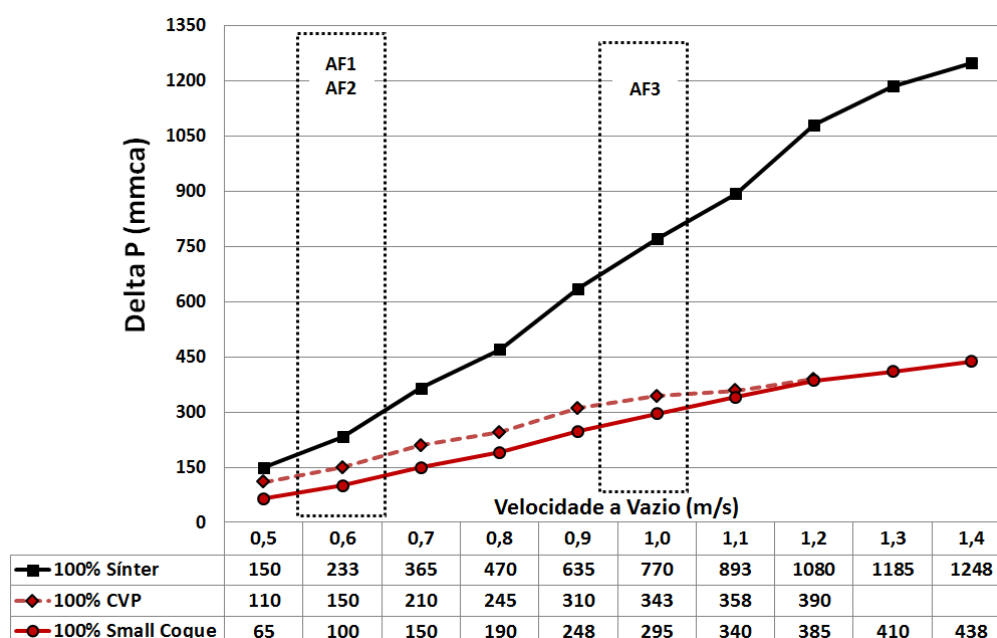


Figura 4.3 – Resultados de resistência à permeabilidade em leitos avaliados individualmente.

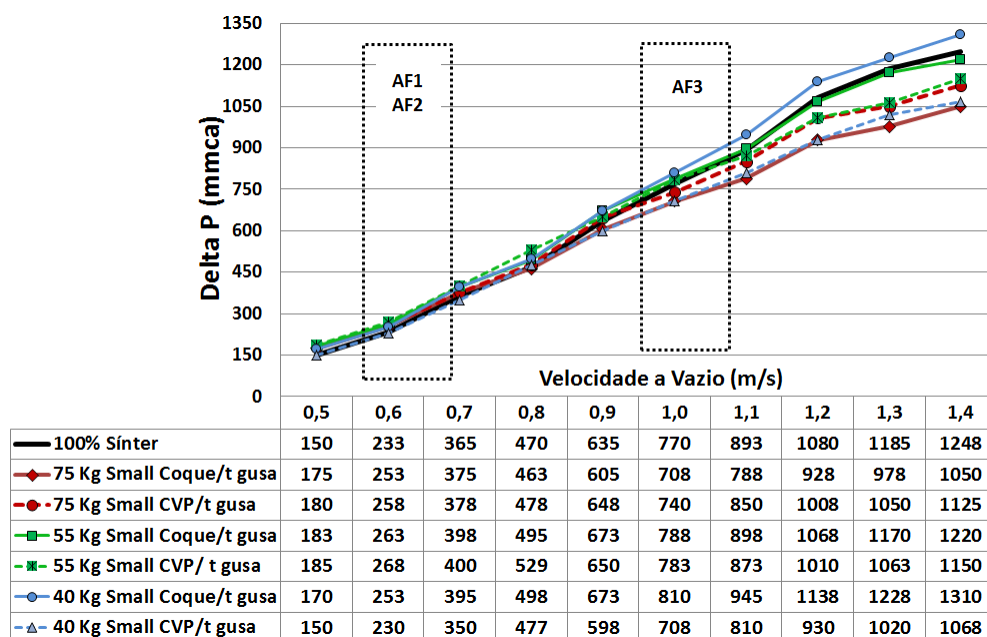


Figura 4.4 – Resultados de resistência à permeabilidade leitos avaliados em combinações binárias.

Para todas as matérias-primas, ao elevar a vazão de gás e, conseqüentemente, elevar a velocidade a vazio, ocorreu maior perda de pressão do gás ao percorrer o leito poroso.

Nas velocidades a vazio correspondentes àquelas dos altos-fornos, tanto a presença de *small coke* como a presença de *small CVP* não causou variação significativa na resistência à permeabilidade do leito de sinter. Importante salientar que o ganho de permeabilidade no uso de combustíveis sob a forma de *small* está associado às reações de redução à medida que a temperatura é elevada, variável que é desconsiderada no ensaio em questão.

4.3. Resultado dos ensaios em A&F

Os principais resultados do ensaio em A&F são apresentados na tabela IV.5 e graficamente nas Figuras 4.5 e 4.6.

Pela Figura 4.5 é apresentado o grau de redução do material e sua respectiva temperatura no início do amolecimento. Neste quesito, a adição de *small* favorece o desempenho do sinter, independente do tipo ou quantidade. Além disso, o melhor resultado foi obtido com o uso de *small coke* carregado na equivalência de 75kg/t gusa.

Tabela IV.5 – Resultados dos ensaios em A&F realizados no sinter individual e com adição de combustível sob a forma de *small*.

CARGA	Sinter	Sinter+25CVP	Sinter+50CVP	Sinter+75CVP	Sinter+25COQ	Sinter+50COQ	Sinter+75COQ
Ts (°C)	1282	1283	1293	1292	1287	1288	1317
Te (°C)	1449	1454	1474	1438	1458	1458	1464
ΔT (°C)	166	171	181	146	171	170	146
S (kg*°C/cm ²)	26,16	26,92	21,22	14,12	20,25	19,69	7,03
ΔP_{max} (mmH ₂ O)	2638	2909	2526	1786	2904	2440	968
RS200 (%)	76,10	78,30	80,92	76,72	77,99	77,68	84,61
R1200°C (%)	72,75	74,70	76,06	71,25	73,84	73,54	75,03

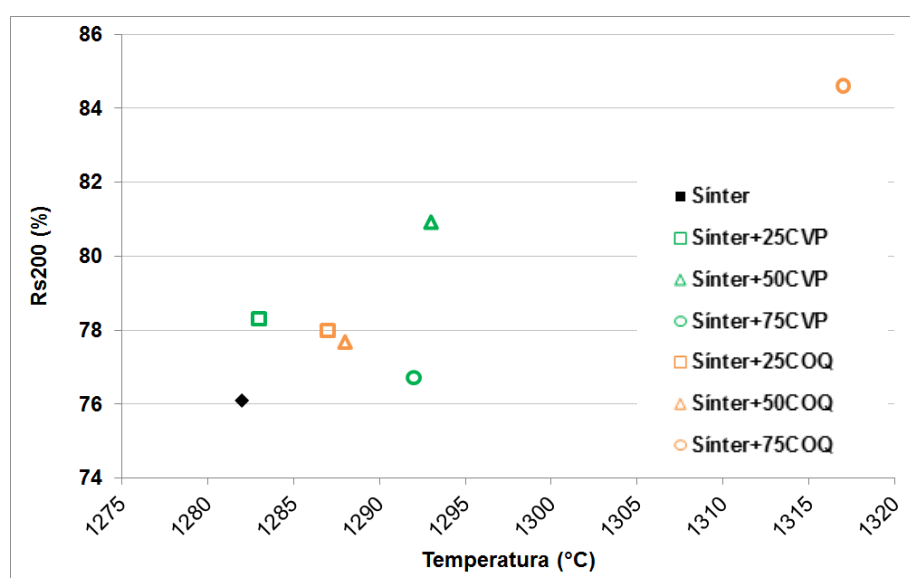


Figura 4.5 – Grau de redução *versus* temperatura início amolecimento para as cargas analisadas.

Nas Figuras 4.6 (a) e (b) é apresentada a resistência à permeabilidade que leva em consideração o pico máximo de pressão e a variação da temperatura de início de amolecimento e final de fusão (espessura da zona coesiva).

Na taxa equivalente a 25kg/t gusa, houve ligeiro aumento no pico de pressão em sinal de que o combustível não foi suficiente para suprir o aumento de espessura na camada metálica. Entretanto, o aumento do combustível até o equivalente a 75kg/t gusa foi extremamente favorável à queda no pico de pressão, especialmente quando foi utilizado o coque.

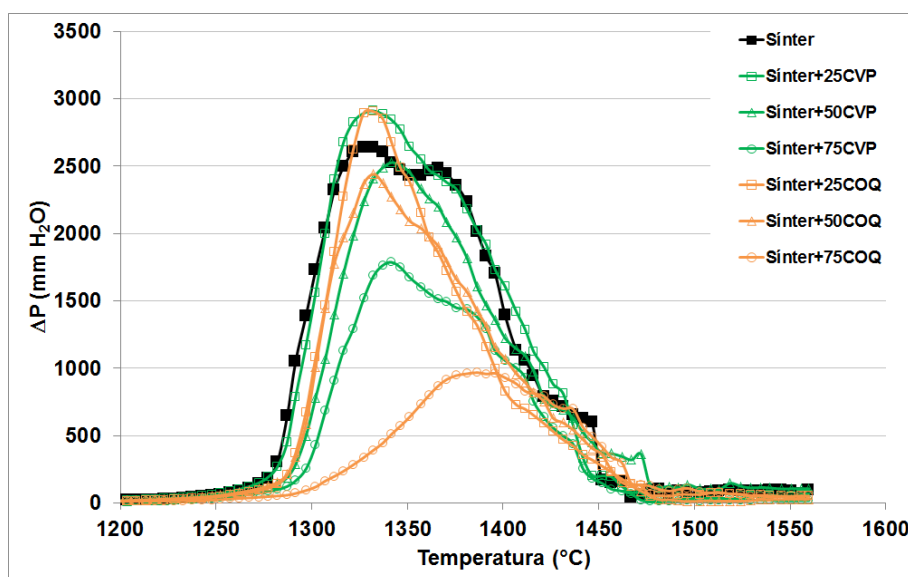
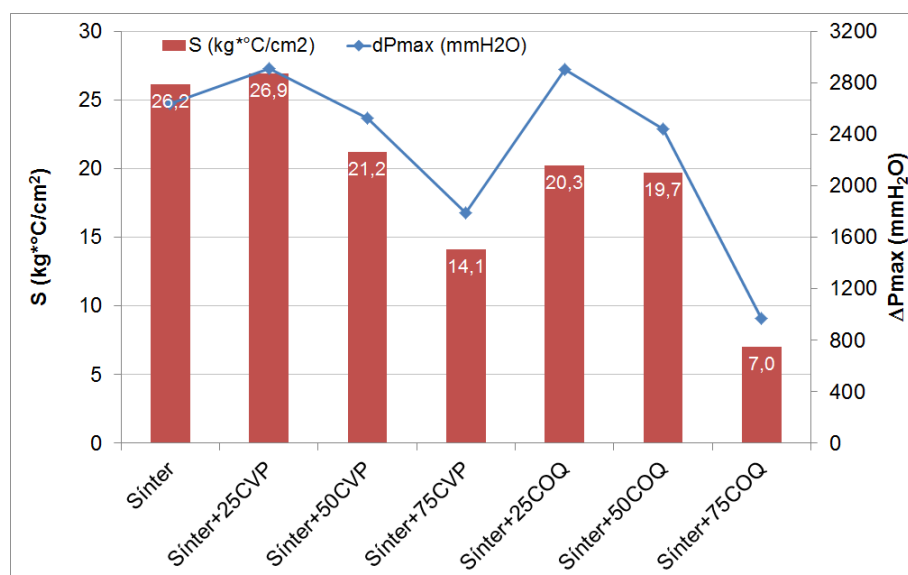
(a) variação de pressão *versus* temperatura(b) área abaixo da curva pressão *versus* temperatura e variação máxima de pressão

Figura 4.6 – Resultados em A&F para as cargas analisadas.

Resumidamente, os resultados do ensaio de amolecimento e fusão indicaram que a adição de combustível sob a forma de *small* favorece ao desempenho do sinter, e, em baixas proporções não há diferença relevante no uso de coque ou CVP. Aspectos como maior grau de redução no início do amolecimento, estreitamento da zona coesiva e menor pico de pressão favorecem ao menor consumo de combustível e a maior produtividade do alto-forno.

4.4. Teste industrial

Os principais parâmetros operacionais durante os períodos de teste são apresentados na Figura 4.7. As barras em azul são referentes à operação normal do alto-forno com *small coke*, em vermelho, nas ocasiões em que foi testado o CVP sob a forma de *small* e em verde nos dias de parada do alto-forno.

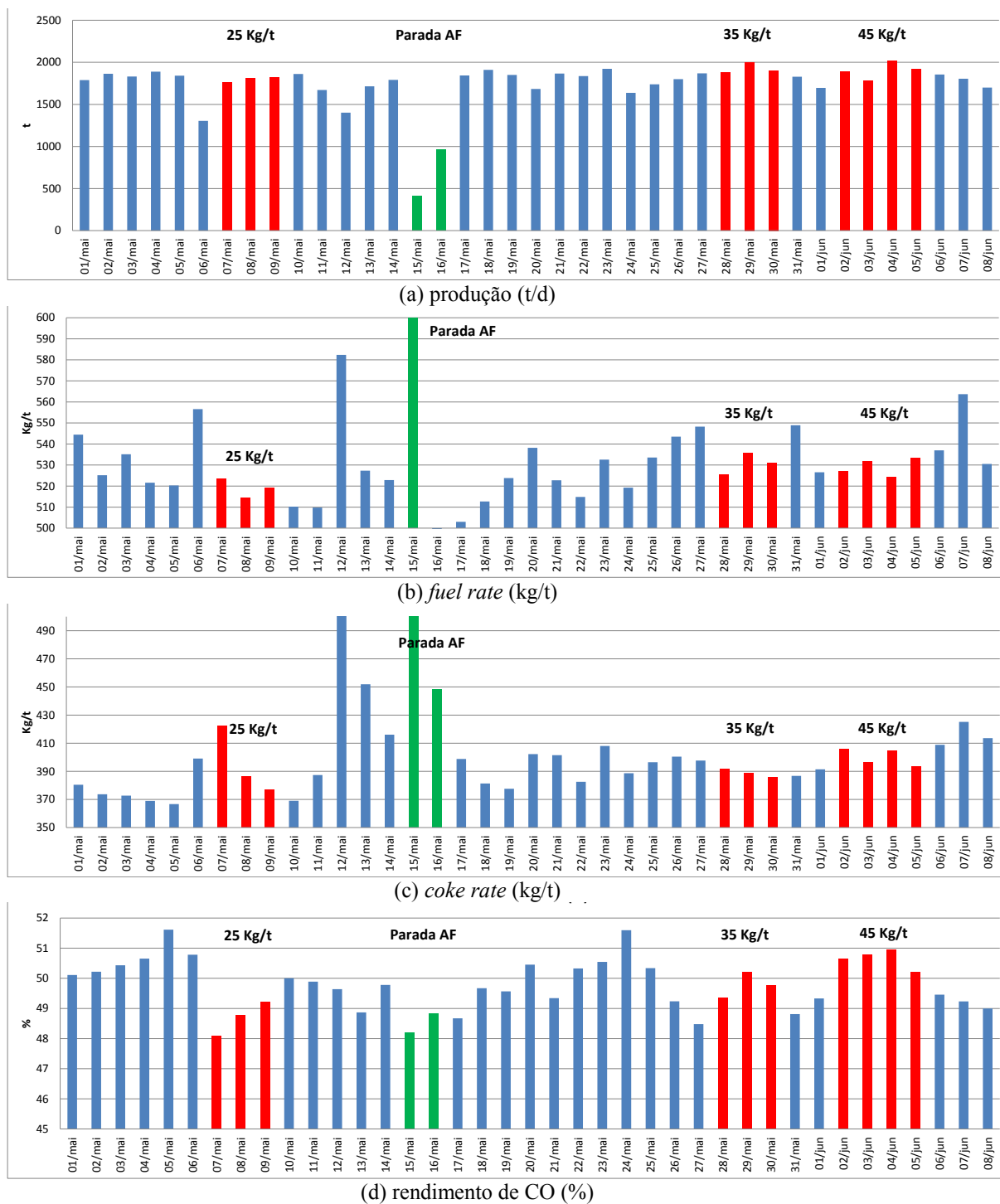
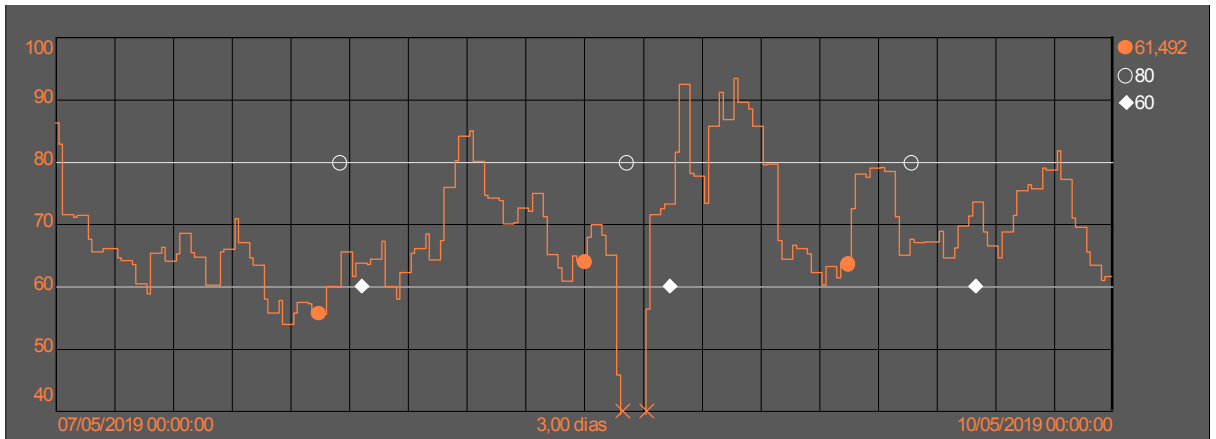
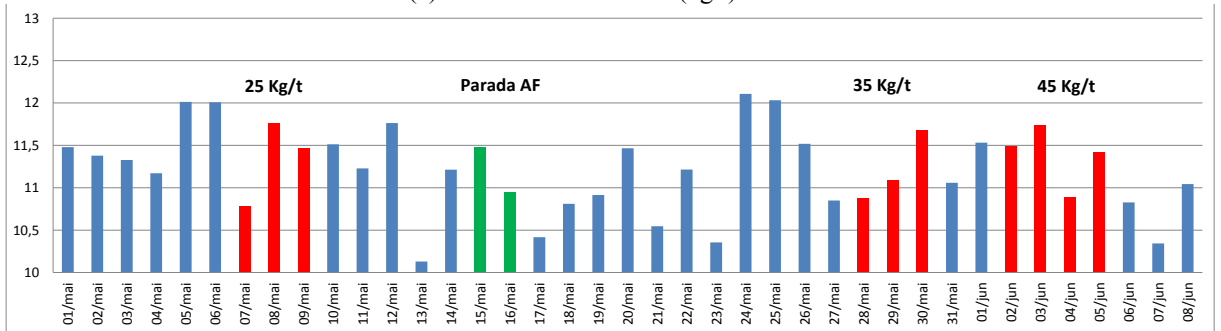


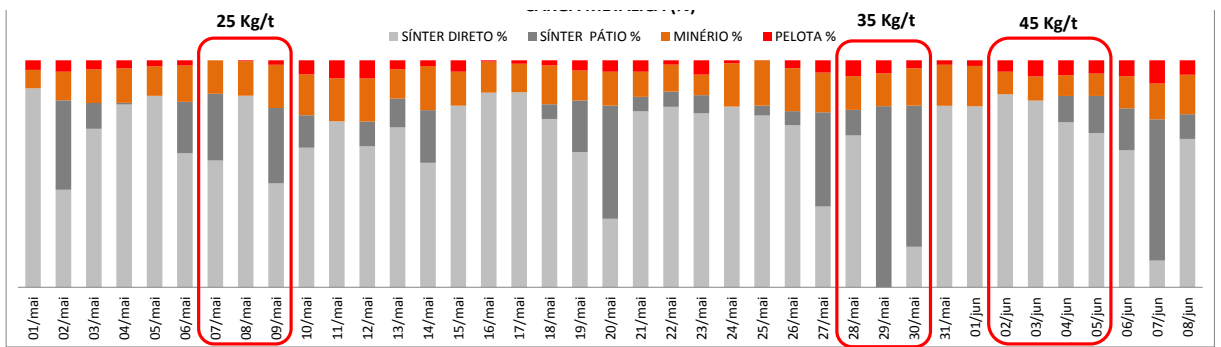
Figura 4.7 – Parâmetros operacionais no período de teste.



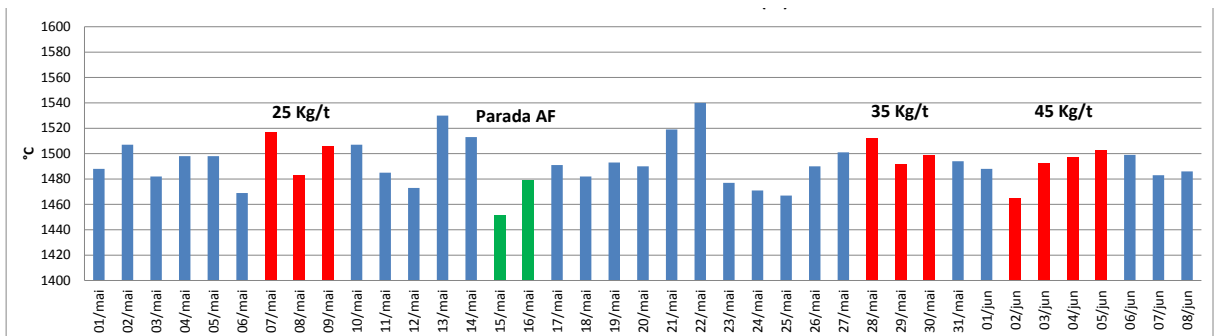
(e) carbono solution loss (kg/t)



(f) índice de resistência à permeabilidade (-)



(g) carga metálica (%)



(h) temperatura do gusa (°C)

Figura 4.7 – Parâmetros operacionais no período de teste. (Continuação)

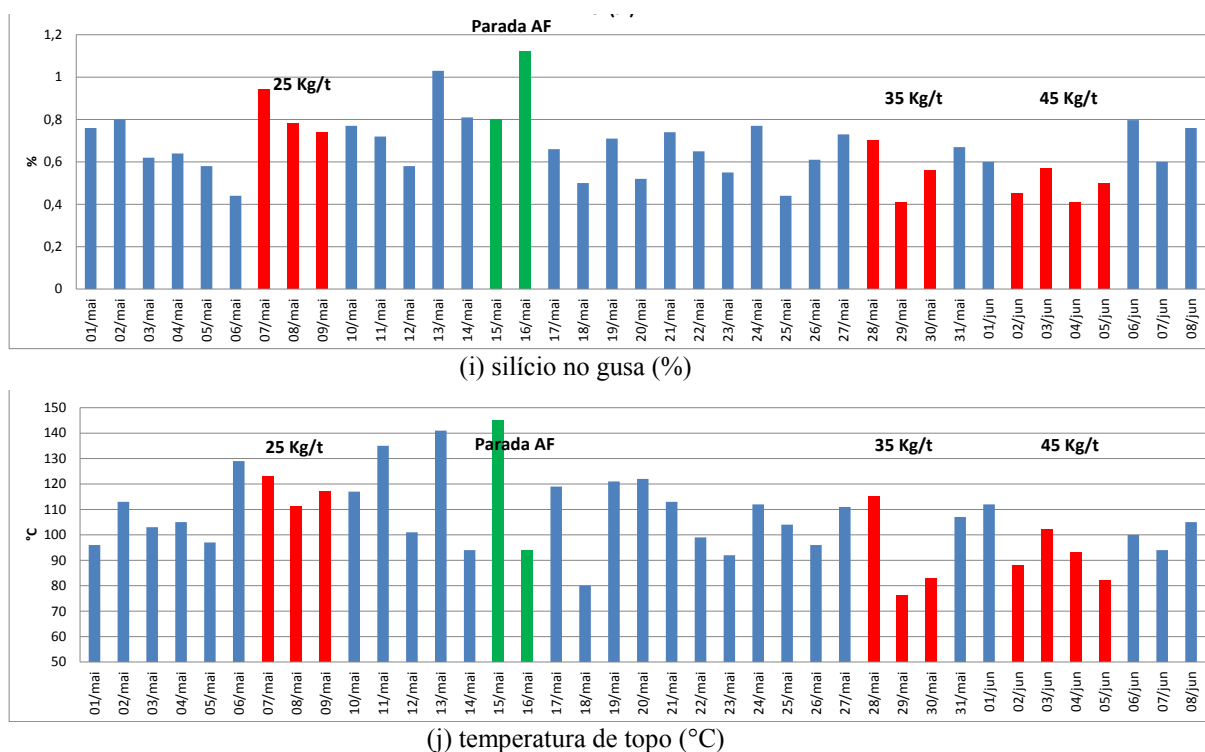


Figura 4.7 – Parâmetros operacionais no período de teste. (Continuação)

Em relação ao processo, ressalta-se que a produção do alto-forno não foi afetada pelo consumo do *small CVP*, apresentando até mesmo picos de produção no período, Figura 4.7 (a). Este resultado é favorável, uma vez que se busca elevada produtividade em altos-fornos especialmente em usinas integradas a coque.

Não foi observada elevação do *fuel rate* e do *coke rate*, sendo mantida a taxa média usual nos períodos do teste, Figuras 4.7 (b) e (c). Este resultado apresenta vantagens para o processo, dada a contínua necessidade de redução de custo do gusa.

Em termos de rendimento gasoso, o resultado foi superior a 50% quando foi carregado 45 kg/t de CVP na carga, em consequência do controle no carbono *solution loss* (CSL), que teve resultados dentro da faixa de controle na maior parte do tempo, Figuras 4.7 (d) e (e). Este resultado reflete o bom desempenho do processo de redução, certamente favorecido pela presença de combustível no meio da carga metálica, conforme indicado pelos ensaios em A&F.

A resistência à permeabilidade do alto-forno, indicada na Figura 4.7 (f), oscilou de maneira natural durante todo o período analisado, permanecendo dentro do controle

durante o uso do CVP, mesmo em condições de elevado uso de sinter do pátio, indicado pela variação do *mix* de carga metálica na Figura 4.7 (g). Este resultado industrial é interessante, pois reflete a maior capacidade de absorção de finos em altos-fornos de pequeno porte quando comparado àqueles de grande porte, conforme indicado em ensaios no Simulador de Perda de Carga.

No tocante à qualidade do gusa, os resultados são favoráveis ao uso de *small* CVP uma vez que não foram observadas variações significativas na temperatura e silício do gusa, Figuras 4.7 (h) e (i). Este resultado já era esperado porque o CVP possui teor de cinza extremamente baixo, reduzindo o aporte de contaminantes no alto-forno quando comparado ao coque.

Vale ressaltar ainda a temperatura do topo, que trabalhou dentro da média, com exceção dos dias 29/05/19 e 30/05/19, quando apresentou temperaturas muito baixas devido consumo excessivo de sinter do pátio, Figura 4.7 (j).

Foi avaliada a amostra do pó de balão no período do teste com consumo de 35 kg/t, na qual foi identificada a presença de 16% de CVP livre, 38% de partículas oriundas da carga metálica e 46% de coque. A presença do CVP no pó de balão, oriundo do arraste dos finos pelo gás, indica a necessidade de ajuste na granulometria desse material, para garantir o seu carregamento na faixa granulométrica maior que 10mm. Na Figura 4.8 é apresentada a fotomicrografia do pó de balão, com a presença de partículas livres de CVP.

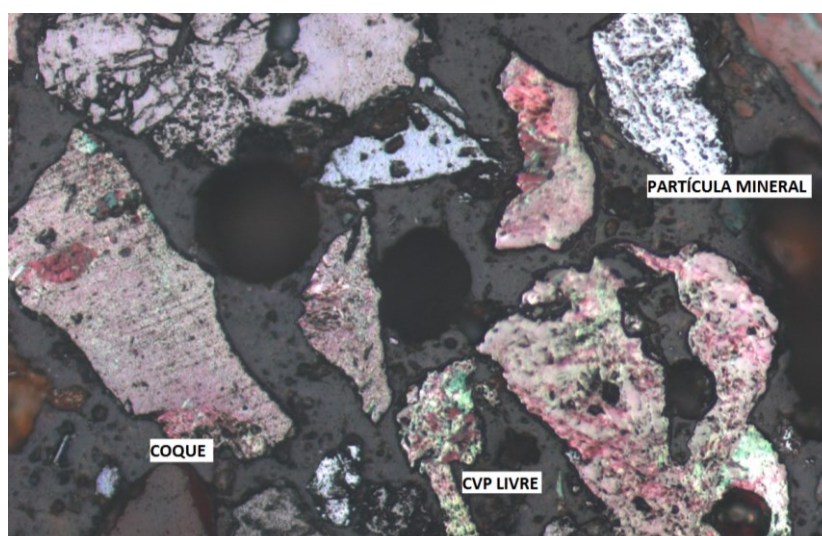


Figura 4.8 – Fotomicrografia do pó de balão no período de teste.

5. CONCLUSÕES

O CVP apresentou baixo teor de cinza (0,77%) quando comparado ao coque (8,00%) utilizado. Entretanto, em função de sua maior matéria volátil (10,90%) apresenta carbono fixo (88,33%) ligeiramente inferior ao coque (91,40%).

Os resultados em A&F indicaram que a adição de combustível sob a forma de *small* favorece ao desempenho do sínter, e, em baixas proporções não há diferença relevante no uso de coque ou CVP.

Tecnicamente, o uso do coque verde de petróleo (CVP) em substituição ao *small coke* é uma possibilidade em reatores de pequeno porte, sendo, portanto, uma alternativa adicional a ser avaliada economicamente. No teste industrial realizado no alto-forno, os resultados indicaram que o uso de CVP não impactou no consumo de combustível e na estabilidade operacional, apontando a possibilidade de substituição de até 45 kg/t gusa, com manutenção do *fuel rate*, da permeabilidade e da produtividade do alto-forno.

Vale ainda ressaltar a necessidade de ajuste na granulometria do *small CVP* de modo a propiciar a obtenção de melhor desempenho dessa matéria-prima quando utilizada em altos-fornos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento do CVP sob a forma de *small* em testes de amolecimento e fusão, com diferentes tipos de carga metálica (sinter, pelota, NPO).
- Avaliar outros tipos de combustíveis sob a forma de *small* em alto-forno, como, antracito e carvão vegetal.

7. APÊNDICES

APÊNDICE I – ARTIGO PUBLICADO

EFEITO DA UTILIZAÇÃO DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO SOB A FORMA DE SMALL NO ALTO-FORNO

*Adriano Cesar Carvalhido
Beatriz Fausta Gandra
Larissa Rodrigues de Carvalho Rocha
Maurício Covcevich Bagatini*

Contribuição técnica ao 49º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 7º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week 2019, realizada de 01 a 03 de outubro de 2019, São Paulo, SP, Brasil.

8. REFERÊNCIAS

1. BABICH, A.; SENK, D.; GUDENAU, H. W.; MAVROMMATIS, K. Th. “Ironmaking”. Textbook, Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen University, Department of Ferrous Metallurgy, 2008.
2. ANDRADE, F. C.; SANTOS, R. J.; OLIVEIRA, W. B. “Evolução da operação do Alto-Forno A da ArcelorMittal Monlevade com Elevada Participação de *Small Coke* na Carga Redutora”. ABM, 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto – MG, 2009.
3. FUJIHARA, F. K.; GUSHIKEN, J. I.; DEFENDI, G. A.; PERDIGÃO, L. P. “Coke Consumption Philosophy at ArcelorMittal Tubarão Blast Furnaces”. 6th IAS Reduction Conference, Rosário – Argentina. Novembro, 2007.
4. SONG, Q. “Effect of Nut Coke on the Performance of the Ironmaking Blast Furnace.” PhD Thesis – Department of Materials Science and Engineering of Delft University of Technology (TUDelft). July, 2013.
5. MOUSA, E. A.; BABICH, A.; SENK, D. “Effect of Nut Coke-sinter Mixture on the Blast Furnace Performance”. ISIJ International, Vol. 51, No. 3, pp. 350-358, 2011.
6. WATAKABE, S.; TAKEDA, K.; NISHIMURA, H.; GOTO, S.; NISHIMURA, N.; UCHIDA, T.; KIGUCHI, M. “Development of High Ratio Coke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace”. ISIJ International, Vol. 46, No.4, pp. 513-522, 2006.
7. GAVEL, D. J. Review on Nut Coke Utilisation in the Ironmaking Blast Furnaces. Materials Science and Technology, 2016.
8. BABICH, A.; SENK, D.; GUDENAU, H. W. “Effect of coke reactivity and nut coke on blast furnace operation”. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 36, No 3, pp. 222 a 229. 2009.
9. GANDRA, B. F.; REIS, H. M. B.; FERNANDES, M. V. Análise do Efeito de Diferentes Combustíveis na Condição de *Small* em Altos-Fornos. Contribuição Técnica ao 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, parte integrante da ABM Week. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

10. BAGATINI, M. C., Estudo da reciclagem de carepa através de briquetes autorredutores para uso em forno elétrico a arco (Tese de doutorado), Porto Alegre, 2001.
11. BAGATINI, M. C.; ZYMLA, V.; OSÓRIO, W.; VILELA, A. C. F. Carbon Gasification in Self-reducing Mixtures. *ISIJ International*, Vol. 54, No. 12, pp. 2687-2696. 2014.
12. JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. JIS M 8711: Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter. 1987.
13. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4696-1: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 1: Reduction with CO, CO₂, H₂ and N₂. 2015.
14. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7215: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of the reducibility by the final degree of reduction index. 2015.
15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5341 / D5341M – Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR). 2014.