

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DE CARVÃO DE PCI, EM
DIFERENTES TAXAS DE INJEÇÃO, APLICADA AO ALTO-FORNO A DA
ARCELORMITTAL MONLEVADE.**

Autor: Leonardo Francisco Berçot
Orientador: Prof. Dr. Leandro Rocha Lemos

Belo Horizonte

2022

Leonardo Francisco Berçot

Avaliação da eficiência de combustão de carvão de PCI, em diferentes taxas de injeção, aplicada ao Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade

Dissertação apresentada ao Curso de Pósgraduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e De Minas.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Rocha Lemos.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2022

B486a

Berçot, Leonardo Francisco.

Avaliação da eficiência de combustão de carvão de PCI, em diferentes taxas de injeção, aplicada ao Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade [recurso eletrônico] / Leonardo Francisco Berçot. - 2022. 1 recurso online (49 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Leandro Rocha Lemos.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 47-49.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Altos-fornos - Teses. 4. Carvão - Combustão - Teses. 5. Ferro gusa - Teses. 6. Carbono - Teses. 7. Termogravimetria - Teses. I. Lemos, Leandro Rocha. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)



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

UFMG

***AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DE CARVÃO DE PCI,
EM DIFERENTES TAXAS DE INJEÇÃO, APLICADA AO ALTO-FORNO
A DA ARCELORMITTAL MONLEVADE***

LEONARDO FRANCISCO BERÇOT

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 22 de julho de 2022.

Por:

Prof. LEANDRO ROCHA LEMOS (UFMG)
Orientador

Prof. ROBERTO PARREIRAS TAVARES (UFMG)

PAULO SANTOS

ASSIS:13074024615

Assinado de forma digital por
PAULO SANTOS ASSIS:13074024615
Dados: 2022.07.23 22:59:27 -03'00'

Prof. PAULO SANTOS ASSIS (UFOP)

Dedico esse trabalho a Deus,

Aos meus pais Francisco (in memoriam), e Luci Léa, que sempre se esforçaram ao máximo para dar a mim e aos meus irmãos, o melhor que eles puderam, desde ética, caráter, à melhor educação possível.

À minha esposa Claudinea por todo o apoio, carinho e compreensão.

À minha pequena Sofia, por encher a minha vida de amor e sentido.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a todos que contribuíram nesse projeto de pesquisa.

À ArcelorMittal Monlevade, pelo encorajamento, oportunidade e apoio institucional e financeiro, nas pessoas de Rubens Moreira Bicalho e Thiago Públio Rocha Teixeira, gerentes da gerência de Redução durante o período de condução desse projeto de pesquisa e ao Diretor da unidade, Fabiano Cristeli de Andrade.

Agradeço aos colegas do centro de pesquisa da ArcelorMittal Brasil, Filipe Mansur e Lucas Quaresma, responsáveis pelos ensaios laboratoriais, cujo suporte, foi absolutamente fundamental para a execução desse projeto.

Agradeço aos amigos, engenheiros de processo do Alto-forno A, Luiz Brandão, Ângelo Storti e Rodrigo Borges pelas discussões técnicas e suporte nos meus momentos de ausência parcial na rotina operacional, para dedicação a esse projeto de pesquisa.

Agradecimento mais que especial à equipe do PVU (prolongamento de vida útil) do Alto-forno A, nas pessoas dos senhores Davi Ezequiel Nunes da Silva, Jorge Luiz de Souza Taveira, Rodrigo Pinheiro Leão e Deílson Soares da Silva, por me ajudarem em todo o processo de confecção e manutenção dos equipamentos da linha de amostragem e na coleta propriamente dita, de amostras de pó no topo do Alto-forno A para ensaios laboratoriais.

Ao professor Leandro Rocha Lemos pela orientação e discussões técnicas.

RESUMO

Este trabalho tem a finalidade de estabelecer um procedimento metódico para avaliação da eficiência de combustão do carvão ou mix de carvões de PCI injetados nas ventaneiras do Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade. Para isto foram coletadas amostras de pó no topo do referido alto-forno para posterior análises termogravimétricas que tem a finalidade de separar os diferentes tipos de carbono, sendo eles originários do coque metalúrgico e de uma possível parcela de carvão injetado nas ventaneiras e não queimados dentro do reator. Através dos experimentos realizados, pôde-se concluir que não houve perda de eficiência de combustão significativa para as faixas de trabalho normalmente aplicadas ao Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade, cujos valores se encontram entre 160 a 180 kg/t. A maior perda de eficiência ocorreu comparando-se os extremos de taxa de injeção analisados no presente trabalho, sendo eles: 130 e 185 kg/t, entre esses dois cenários, foi encontrado elevação do teor de carbono originário do carvão de PCI de aproximadamente 2 kg/t, valor baixo, quando comparado aos benefícios de ganho de produtividade e redução de custo de produção de ferro-gusa trazidos na operação com maior taxa de injeção. Os resultados encontrados são coerentes com publicações técnicas na comunidade científica, onde são citados que a perda de eficiência de combustão se torna significativa para taxas de injeções de carvão de PCI superiores a 190 kg/t. Finalmente, o procedimento adotado poderá servir para análises na planta de Monlevade em ocasiões de utilização de novos carvões, misturas de diferentes combustíveis e/ou operações com maiores taxas de injeção em relação as praticadas atualmente.

Palavras-Chave: Alto-forno. Eficiência de combustão de carvão de PCI. Termogravimétrico. Taxa de injeção de carvão. Pó de topo de alto-forno.

ABSTRACT

This study aims to establish a methodical procedure for evaluating the combustion efficiency of coal or PCI coal mix injected into the tuyeres of ArcelorMittal Monlevade's Blast Furnace A. For this, dust samples were collected at the top of the referred blast furnace for further thermogravimetric analysis, which has the purpose of separating the different types of carbon, which originate from metallurgical coke and a possible portion of coal injected into the tuyeres and not burned inside. of the reactor. Through the experiments carried out, it was possible to conclude that there was no significant loss of combustion efficiency for the work ranges normally applied to ArcelorMittal Monlevade's Blast Furnace A, whose values are between 160 to 180 kg/t. The greatest loss of efficiency occurred when comparing the injection rate extremes analyzed in the present work, namely: 130 and 185 kg/t, between these two scenarios, an increase in the carbon content originating from PCI coal of approximately 2 kg/t, low value, when compared to the benefits of productivity gain and cost reduction of pig iron production brought in the operation with higher injection rate. The results found are consistent with technical publications in the scientific community, where it is mentioned that the loss of combustion efficiency becomes significant for PCI coal injection rates above 190 kg/t. Finally, the procedure adopted may be used for analysis at the Monlevade plant when new coals are used, mixtures of different fuels and/or operations with higher injection rates compared to those currently practiced.

Keywords: Blast furnace. Coal combustion efficiency. Thermogravimetric. Coal injection rate. Blast furnace top dust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - O processo contracorrente do alto-forno segundo GEERDES et al (2009).	16
Figura 3.2 - Fluxograma de uma planta de moagem, secagem e injeção de carvão pulverizado em altos-fornos. Fonte: CARPENTER (2006).....	23
Figura 3.3 - Modelo da combustão de uma partícula de carvão segundo ASSIS et al (2004).....	24
Figura 3.4 - Combustão do carvão, segundo GEERDES et al. (2009).....	24
Figura 3.5 - Descrição esquemática de uma partícula de carvão, segundo FERNANDES (2007).....	25
Figura 3.6 - Evolução do processo de queima das partículas de carvão de PCI injetado no alto-forno.	26
Figura 3.7 - Evolução da composição química dos gases gerados no raceway segundo CARPENTER (2006).....	27
Figura 3.8 - Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo segundo SILVA (2006).....	29
Figura 3.9 – (a) Morfologia de char e fuligem: uma estrutura cenosférica de char; (b) partícula de fuligem na amostra de poeira industrial, segundo NG et al (2016).	31
Figura 3.10 - Imagem de microestrutura de partículas de carbono de diferentes origens obtidas pelo microscópio DRMP RXP, segundo WU et al (2008).	33
Figura 3.11 - Divisão de resíduos carbonosos do pó de topo de alto-forno em função de sua granulometria, adaptado de NG et al., (2016).	36
Figura 3.12 - Perfil de combustão de amostras de lama de alto-forno com granulometria maiores e menores que 150µm de acordo com NG et al (2016).....	37
Figura 3.13 - Curva termogravimétrica para lama de alto-forno.....	38
Figura 4.1 - Amostragem do pó no topo do Alto Forno A.....	42
Figura 4.2 - Gráfico de eficiência de separação do ciclone para vazão de 5m ³ /h43	43
Figura 4.3 - Modelo do ciclone para coleta de pó de topo de alto-forno.....	43
Figura 4.4 - Diagrama de um equipamento para análises termogravimétricas, segundo DENARI et al (2012).....	45
Figura 4.5 - Equipamento Perseus® STA 449.....	45
Figura 4.6 - Curva de temperatura x tempo para um ensaio termogravimétrico segundo NG et al., (2016).....	47
Figura 4.7 - Curva termogravimétrica para lama de alto-forno, segundo NG et al (2016)	48

Figura 5.1 - Evolução dos resíduos carbonosos oriundos do PCI em função da taxa de injeção.....	53
Figura 5.2 - Teor de carbono medido no SLG x taxa de injeção de carvão entre 2016 a 2022.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Resultado médio da análise imediata do pó gerado no sistema de limpeza de gás do Alto-forno A em 2020.....	18
Tabela IV.1 - Tabela com principais características da Perseus® STA 449.	46
Tabela IV.2 - Parâmetros TGA para Teste de Diferenciação de Carbono de Pó e Lama de alto-forno.	47
Tabela V.1 - Dados operacionais do Alto-forno A nos dias de coleta de amostras de pó de topo.	51
Tabela V.2 – Resultados dos ensaios termogravimétricos de amostras do topo do AFA.	52

LISTA DE NOTAÇÕES

AFA – Alto-forno A

CSR – Coke strength after reduction

GAF – Gás de alto-forno

HGI – Hardgrove grindability index

PCI – Pulverized Coal Injection

TGA – Termogravimétrico

SLG – Sistema de limpeza de gases

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 O processo do alto-forno	16
3.2 Operação de altos-fornos em altas taxas de injeção de carvão de PCI	18
3.3 Rota do carvão mineral em usinas siderúrgicas	20
3.4 Fundamentos da combustão do carvão mineral pulverizado no alto-forno	23
3.5 Fatores que influenciam na combustão do carvão	27
3.6 Eficiência da combustão do carvão de PCI no alto-forno	29
3.7 Métodos de avaliação da eficiência de combustão do carvão	32
4. METODOLOGIA	40
4.1 Desenvolvimento do projeto	40
4.2 Amostragem e preparação do pó de topo de alto-forno para ensaios termogravimétricos	41
4.3 Método termogravimétrico	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 Resultados operacionais do Alto-forno A nos dias de coletas de amostras	50
5.2 Resultados dos ensaios termogravimétricos	52
5.3 Avaliação da eficiência de combustão versus geração de resíduos do sistema de limpeza de gases	54
6. CONCLUSÃO	56
7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	57
8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	58
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras de altos-fornos é uma prática comum e objetivada na siderurgia moderna por trazer expressiva redução de custo na produção de ferro gusa. O carvão mineral substitui parcialmente o coque metalúrgico, que é um combustível mais caro. Nos dias atuais, o preço da tonelada do carvão mineral varia entre 40 e 60% do preço da tonelada do coque, o que justifica os contínuos esforços dos grupos siderúrgicos em maximizar a injeção de carvão mineral pulverizado e minimizar o consumo de coque metalúrgico nos altos-fornos.

Além da redução de custo, a injeção de carvão pulverizado eleva a produtividade dos altos-fornos, devido ao ganho de volume interno para enformamento de carga metálica com a substituição parcial do coque e da prática de enriquecimento do ar atmosférico por oxigênio, tornando-o mais concentrado.

A prática da injeção de carvão pulverizado em altos-fornos teve seu início na década de 1960, porém o seu grande impulso ocorreu a partir da década de 1980 alcançando patamares incrivelmente elevados a partir dos anos 2000, com valores próximos a 220kg de carvão/t de gusa.

A unidade da ArcelorMittal situada na cidade de João Monlevade, MG, possui um alto-forno, nomeado de Alto-forno A, com uma produção diária no patamar de 3.000t de gusa, com uma planta de moagem, secagem e injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno.

Do *start-up* do Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade aos dias atuais, vários projetos visando a substituição de coque por carvão pulverizado foram elaborados. No ano de 2019, o valor médio de taxa de injeção de carvão pulverizado foi de 172kg/t gusa, alcançando de forma estável em vários períodos, o valor de 180kg/t com a implantação de um novo vaso de injeção, totalizando três vasos. Antes da implantação deste equipamento o patamar médio alcançado era de 160kg/t.

A substituição de coque por carvão na maioria das indústrias siderúrgicas é definida pela redução de seu consumo específico, em kg/t gusa, em detrimento do aumento no consumo específico de carvão de PCI, em kg/t gusa. Segundo NG et al., (2016) algumas correlações são encontradas na literatura para o cálculo da taxa de substituição, seja via teor de carbono ou do poder calorífico dos dois combustíveis. Essas correlações assumem a combustão completa do carvão no interior do alto-forno, entretanto o comportamento da combustão é quase sempre incompleto, sendo de extrema importância conhecer detalhadamente a combustão do carvão mineral a fim de se evitar problemas operacionais, ambientais e minimizar perdas que onerem o custo de produção de ferro gusa.

Os dois métodos mais utilizados na siderurgia brasileira para acompanhamento da taxa de substituição de coque por carvão de PCI e conseqüentemente da eficiência de combustão do carvão está na avaliação de tendência do *fuel rate*, em kg/t gusa, e da geração de pó e lama no sistema de limpeza de gases, ambos em kg/t gusa. Entretanto, dadas as condições dinâmicas do processo do alto-forno que apresenta, inevitavelmente variações químicas, metalúrgicas e granulométricas das matérias-primas, ambos os meios de inferência sobre a eficiência de queima do carvão podem sofrer impactos devido a tais oscilações, o que dificulta a correta compreensão do fenômeno, tornando dessa forma necessário o desenvolvimento de uma técnica que permita avaliar a eficiência de combustão do carvão de PCI, independentemente das variações existentes no processo de produção de gusa.

2. OBJETIVO

O propósito desse estudo foi padronizar a forma de avaliação da eficiência de combustão do carvão de PCI e especificamente, identificar se há piora na eficiência de combustão do carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade à medida que se eleva a taxa de injeção, mantendo-se os demais parâmetros operacionais, tais como: temperatura de sopro, enriquecimento de oxigênio, vazão de sopro, temperatura teórica adiabática de chama e granulometria do carvão injetado, com a menor variação possível. Tais informações fornecerão subsídio para estudos futuros de otimização de processo que poderão até mesmo justificar investimentos na planta caso seja detectado perda de eficiência da combustão.

.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O processo do alto-forno

De acordo com GEERDES et al, (2009) e ilustrado na figura 3.1, o alto-forno pode ser entendido como um reator que opera em contracorrente, enquanto a carga enforada pelo topo desce em direção ao cadinho, o gás gerado em frente às ventaneiras sobe em direção ao topo do alto-forno.

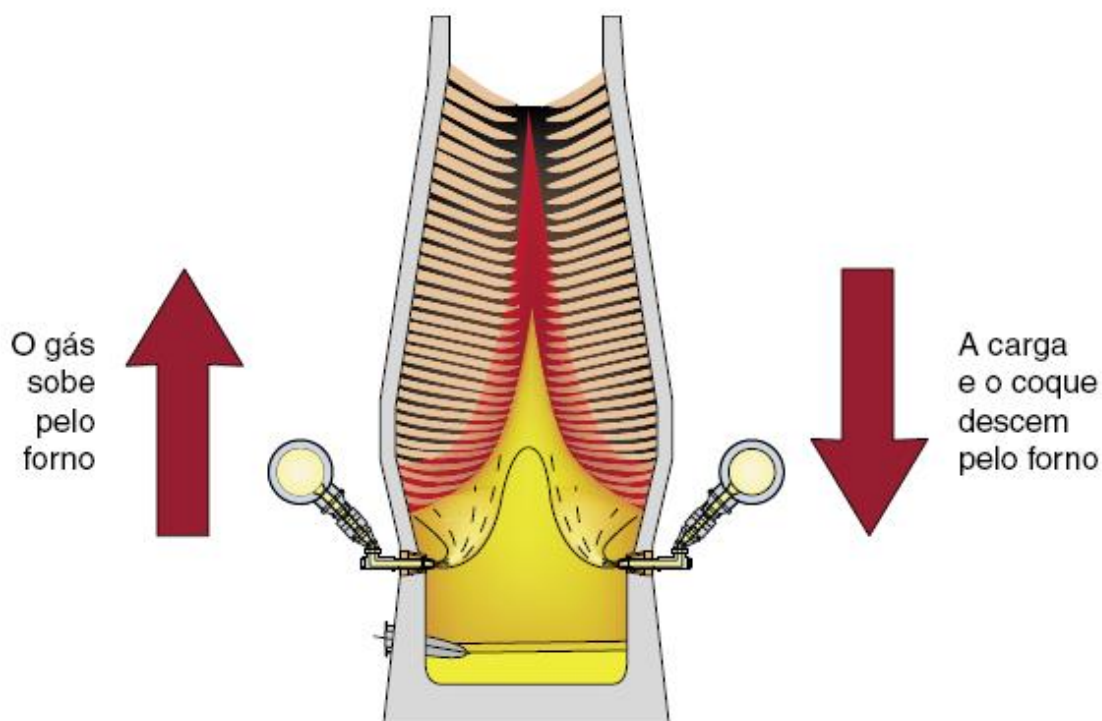


Figura 3.1 - O processo contracorrente do alto-forno segundo GEERDES et al (2009).

Durante a operação em contracorrente ocorrem os fenômenos de transferência de massa e calor entre os diferentes materiais presentes no alto-forno. A transferência de massa se dá principalmente pelas reações de redução dos óxidos metálicos pelo gás monóxido de carbono, onde ocorre a transferência de oxigênio da carga sólida para o gás, conforme as reações a seguir:





Já a transferência de calor se dá pelo aquecimento da carga sólida fria enfiada no topo do alto-forno através do gás ascendente quente, formado em frente às ventaneiras. O alto-forno possui um grande gradiente térmico, na região em frente às ventaneiras é gerado o gás redutor composto de CO, H₂ e N₂ a uma temperatura em torno de 2.100°C. Esse gás aquece a carga sólida saindo pelo topo do alto-forno num patamar de temperatura entre 100 e 150°C.

Devido à natureza do processo do alto-forno composta pelo escoamento do gás ascendente através do material sólido descendente, um dos parâmetros mais importantes a ser controlado é a permeabilidade do leito, que resultará na resistência à passagem do gás. O leito sólido é formado por camadas alternadas de coque metalúrgico e de carga metálica composta por sinter, pelota e minério granulado.

Um dos principais fatores comprometedores da permeabilidade do alto-forno é a presença de finos em seu interior, que são oriundos de diferentes fontes, sendo elas:

- Finos aderidos à matéria-prima metálica que não são removidos no peneiramento;
- Finos gerados no processo interno do alto-forno devido à baixa qualidade metalúrgica das matérias-primas tais como: crepitação, degradação após reações químicas de redução e baixa resistência mecânica.
- Finos de carvão não queimado em frente às ventaneiras.

Embora a presença de finos no interior do alto-forno seja responsável por sérios problemas operacionais, a grande maioria desse material é arrastada para fora do reator pelo gás ascendente, onde serão depositados no sistema de limpeza de gases, dando origem ao pó e lama de alto-forno.

O sistema de limpeza de gases é projetado para separar o gás, rico em poder calorífico, do pó. Tal separação ocorre em duas etapas, na primeira ocorre a separação a seco das partículas maiores de pó com o gás, já na segunda etapa a separação ocorre a úmido das partículas menores de pó com o gás, formando a chamada lama de alto-forno.

A tabela abaixo ilustra uma composição típica de pó gerado no primeiro estágio da limpeza de gases do Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade.

Tabela III. 1 - Resultado médio da análise imediata do pó gerado no sistema de limpeza de gás do Alto-forno A em 2020.

Média dos resultados de análise elementar do pó do Alto-forno A em 2020			
Composto	Carbono	Cinzas	Material Volátil
%	46,13	50,33	3,54

3.2 Operação de altos-fornos em altas taxas de injeção de carvão de PCI

Existem na literatura vários estudos sobre a otimização do processo do alto-forno nos quais são exploradas as tendências de práticas operacionais modernas, que visam o aumento de produtividade e redução do custo de produção. Nesse cenário, enquadra-se a operação com altas taxas de combustíveis auxiliares nas ventaneiras, dentre eles, o carvão de PCI.

LU et al (2001) afirma que em altas taxas de PCI uma quantidade significativa de carvão não queimado pode ser acumulada na cuba do alto-forno causando sérios problemas operacionais, tais como redução de permeabilidade, uma indesejável distribuição gasosa e térmica e possivelmente movimento descendente irregular e não constante da carga sólida do topo em direção ao cadinho (arriamentos e engaiolamento).

YAMAGUCHI et al (1995) ao estudar a operação de fornos na Europa e no Japão, relata que são necessárias adequações no processo do alto-forno para assegurar uma

operação estável, que evitem problemas de permeabilidade, evitem a degradação do coque no *raceway* causando inatividade do homem-morto, e condições favoráveis dos parâmetros de sopro de forma a acelerar a combustão do carvão de PCI em frente às ventaneiras, evitando assim perda de eficiência de combustão e elevação da geração de pó e lama devido ao escape pelo topo do alto-forno de carvão não queimado.

A operação com altas taxas de injeção de carvão de PCI é caracterizada por elevação na quantidade de gás gerado em frente às ventaneiras, devido à desvolatilização da matéria volátil do carvão mineral. Esse maior volume de gás pode gerar descontrole do fluxo térmico na cuba do alto-forno, causando impacto na permeabilidade e elevação de perdas térmicas. Para corrigir esses desvios, alterações de distribuição de cargas são realizadas, de forma a direcionar o fluxo de gás de ascensão para o centro do forno, reduzindo o fluxo pela periferia, típico perfil V invertido da zona coesiva.

O aumento da taxa de injeção de carvão de PCI ocorre em detrimento de redução do enformamento de coque metalúrgico pelo topo do alto-forno. Essa substituição reduz a espessura das camadas de coque, que é a parte mais permeável do leito sólido, causando inevitavelmente uma piora na permeabilidade. Tal situação requer melhor qualidade das matérias primas de forma a minimizar a geração de finos no interior do alto-forno. YAMAGUCHI et al (1995) sugere a utilização de sinter com alta redutibilidade, conseguida pela redução de teores de alumina e MgO, limitação do teor de FeO e matriz com boa porosidade.

A redução do enformamento de coque (substituído pelo carvão de PCI) aumenta a relação de peso da carga metálica/peso da carga de coque, tal situação exige maior resistência mecânica do coque para evitar a sua deterioração e consequente geração de finos, tal propriedade é conhecida por CSR (*coke strength after reduction*) e quanto maior for o seu valor, mais resistente e mais íntegros chegarão as partículas de coque no homem-morto.

Para que os resultados operacionais num cenário com elevada injeção de carvão de PCI sejam maximizados, os parâmetros de sopro devem ser ajustados visando a maior

eficiência de combustão do carvão no *raceway*, onde destaca-se a elevação da temperatura de sopro, elevação do enriquecimento de oxigênio, redução da injeção de vapor de forma a garantir temperatura adiabática teórica de chama em torno de 2.100°C. Nos testes realizados no Alto-forno 3 de Kimitsu, YAMAGUCHI et al (1995) relata que a temperatura de sopro foi elevada ao máximo, correspondente a 1250°C, o enriquecimento de oxigênio foi objetivado na faixa de 4 a 5%, umidade de sopro em 20g/Nm³ para uma taxa de injeção de carvão de PCI máxima de 200kg/t. Como resultado dos experimentos, foi observado que à medida que se eleva a taxa de injeção de carvão de PCI, de 120 até aproximadamente 180kg/t ocorre uma redução gradativa na eficiência de combustão, embora pouco significativa. Entretanto, a partir do patamar de 190kg/t de injeção de carvão pulverizado, a eficiência de combustão sofre rápida e grande piora.

Em seu trabalho de pesquisa sobre a origem do carbono no pó e lama de um alto-forno da Shanghai Baosteel Group Co., China, WU et al (2008), apresenta dados que mostram grande elevação no teor de carbono proveniente do carvão de PCI no pó e lama para taxas de injeção acima de 200kg/t, quando comparado ao patamar de 170kg/t. Entretanto, nesse trabalho não é detalhado os dados operacionais do alto-forno em questão.

Da experiência de operadores de altos-fornos somados a trabalhos já publicados na comunidade científica, a operação estável de altos-fornos com altas taxas de injeção de carvão de PCI, sugere apresentar limites de efetividade que dependerá de uma série de fatores ligados a matérias-primas, tipos de equipamentos, expertise operacional, qualidade do carvão injetado, dentre outros. O que torna necessário o aprofundamento do estudo para cada planta operacional.

3.3 Rota do carvão mineral em usinas siderúrgicas

A rota convencional do carvão mineral em usinas siderúrgicas inicia-se por uma área de recepção, seguida por uma zona de estocagem que pode ser em pilhas formadas em pátios ou em silos que normalmente são cobertos. Ambas as situações possuem vantagens e desvantagens e as características do carvão devem se adequar às

particularidades da planta. Uma das vantagens de estocagem em pilhas é um fácil manuseio em caso de incêndio do carvão, essa situação é tratada como crítica quando a estocagem ocorre em silos. Em contrapartida, uma desvantagem de estocagem em pátios é a absorção de umidade pelo material, devido a exposição a intempéries.

Na ArcelorMittal Monlevade, a estocagem do carvão é feita em silos cobertos. Por questões de layout, a extração do carvão dos silos é feita abaixo do nível do solo, em correias transportadoras que ficam em galerias subterrâneas. Devido a ocorrências de incêndio no passado, com carvões de alto teor de voláteis que causaram grandes dificuldades operacionais para as suas remoções dos silos, foi definido e padronizado a utilização apenas de carvões de baixo e médio teor de voláteis. Atualmente, o mix de injeção de carvões praticados no Alto-forno A apresenta pouca variabilidade nos teores de matéria volátil, cujos valores se apresentam entre 12 a 14% em massa, de acordo com análises imediatas.

Do local de estocagem, o carvão mineral é transferido, normalmente via correias transportadoras, para a planta de moagem, secagem e injeção, onde ele será armazenado em outro silo que alimentará posteriormente o moinho.

No processo de moagem, além da redução granulométrica ocorre também a secagem do carvão mineral para patamares de exigências que se aproximam de 0% de teor de umidade. A secagem é feita através de um gás quente, produto da combustão de gás de alto-forno enriquecido com gás natural e ar atmosférico.

No processo de moagem, os dois parâmetros do carvão mineral de maior importância são: a umidade e HGI (*Hardgrove Grindability Index*). O primeiro parâmetro impacta no consumo energético da planta, pois maiores umidades necessitam de um gás mais quente para a secagem. Caso haja limitação na temperatura do gás, um maior tempo de residência do carvão no moinho será necessário para sua secagem, levando a perda de produtividade de moagem e conseqüentemente limitando a taxa de injeção de carvão no alto-forno. Já o HGI, define a moabilidade do carvão, em outras palavras, o quão macio é o carvão. Quanto maior o HGI, mais fácil será o processo de moagem do carvão.

Sequencialmente à moagem, a mistura gás e carvão moído é sugado por um exaustor principal até chegar num processo de filtragem, normalmente constituídos de filtros de manga, onde é feita a separação do carvão e gás. O carvão separado passa por uma peneira para adequação final da granulometria onde o *under* alimenta um silo (silo de carvão preparado) e o *over* da peneira retorna para o moinho, já o gás é parcialmente descartado para a atmosfera e parcialmente retornado para o processo de secagem.

O carvão moído, seco e peneirado presente no silo de carvão preparado alimenta vasos pressurizados, normalmente por nitrogênio, para em seguida ser transportado pneumaticamente através de tubulações metálicas até os Algaravizes dos Altos-Fornos. Nesse ponto há uma conexão das tubulações com lanças de injeção que são inseridas nos Algaravizes até alcançarem as ventaneiras. Imediatamente após injetado nos Altos-Fornos, o carvão mineral entra em contato com ar atmosférico aquecido a elevadas temperaturas, dando início à combustão na região em frente às ventaneiras, região conhecida como *raceway*.

A figura 3.2 abaixo mostra um fluxograma da planta de moagem, secagem e injeção de carvão pulverizado.

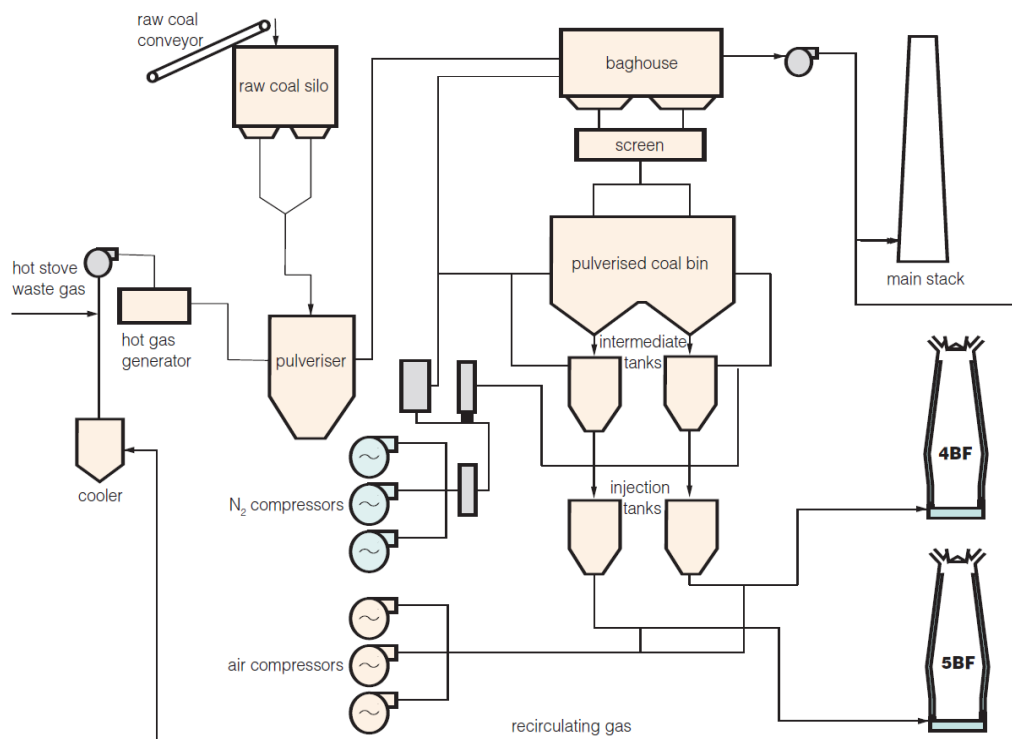


Figura 3.2 - Fluxograma de uma planta de moagem, secagem e injeção de carvão pulverizado em altos-fornos. Fonte: CARPENTER (2006).

3.4 Fundamentos da combustão do carvão mineral pulverizado no alto-forno

A combustão do carvão mineral injetado nos altos-fornos é caracterizada por uma sequência de etapas que podem se sobrepor umas às outras cuja duração se dá na ordem de centésimos de segundo. ASSIS et al. (2004), propuseram o mecanismo mostrado na figura 3.3:

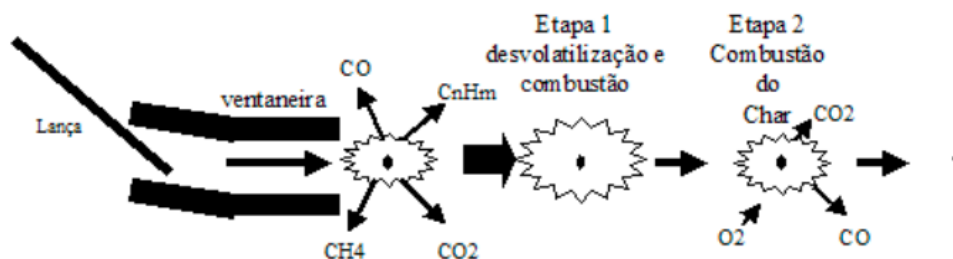


Figura 3.3 - Modelo da combustão de uma partícula de carvão segundo ASSIS et al (2004).

As etapas do processo de combustão do carvão no alto-forno, também conhecido por gaseificação, relatada por GEERDES et al. (2009) e representada na figura 3.3 são descritas como: o carvão é aquecido e a umidade residual se evapora, ocorre um aquecimento adicional do carvão e a gaseificação dos componentes voláteis, estes então entram em combustão causando um aumento de temperatura, por fim, o carbono é queimado. Essas etapas são influenciadas pela taxa de injeção e quanto maior essa taxa, maior será a quantidade de carvão deixando a zona de combustão sem ser gaseificado.

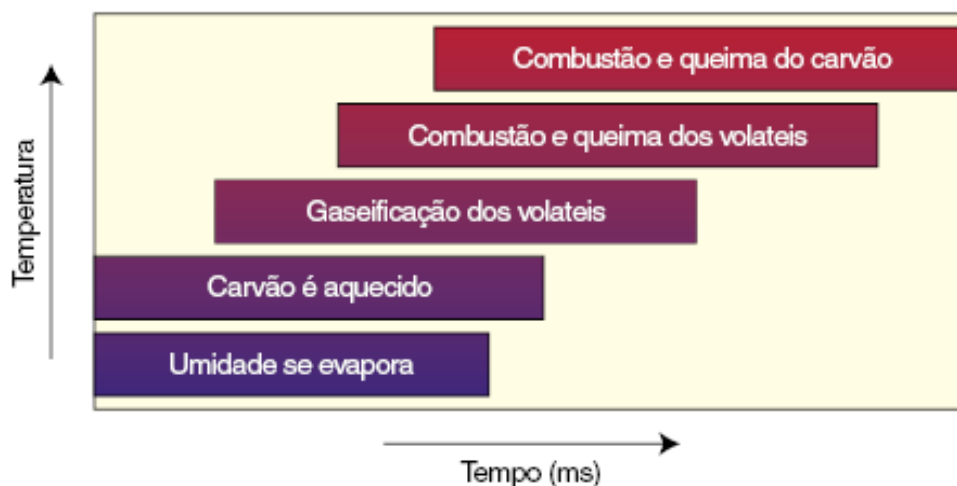


Figura 3.4 - Combustão do carvão, segundo GEERDES et al. (2009)

FERNANDES (2007) cita que a combustão do carvão, como processo físico-químico, pode ser dividida nas seguintes etapas: desgaseificação e ignição da matéria volátil;

queima dos materiais voláteis e queima parcial do carvão restante (char). Essa estratificação é representada na figura 3.5.

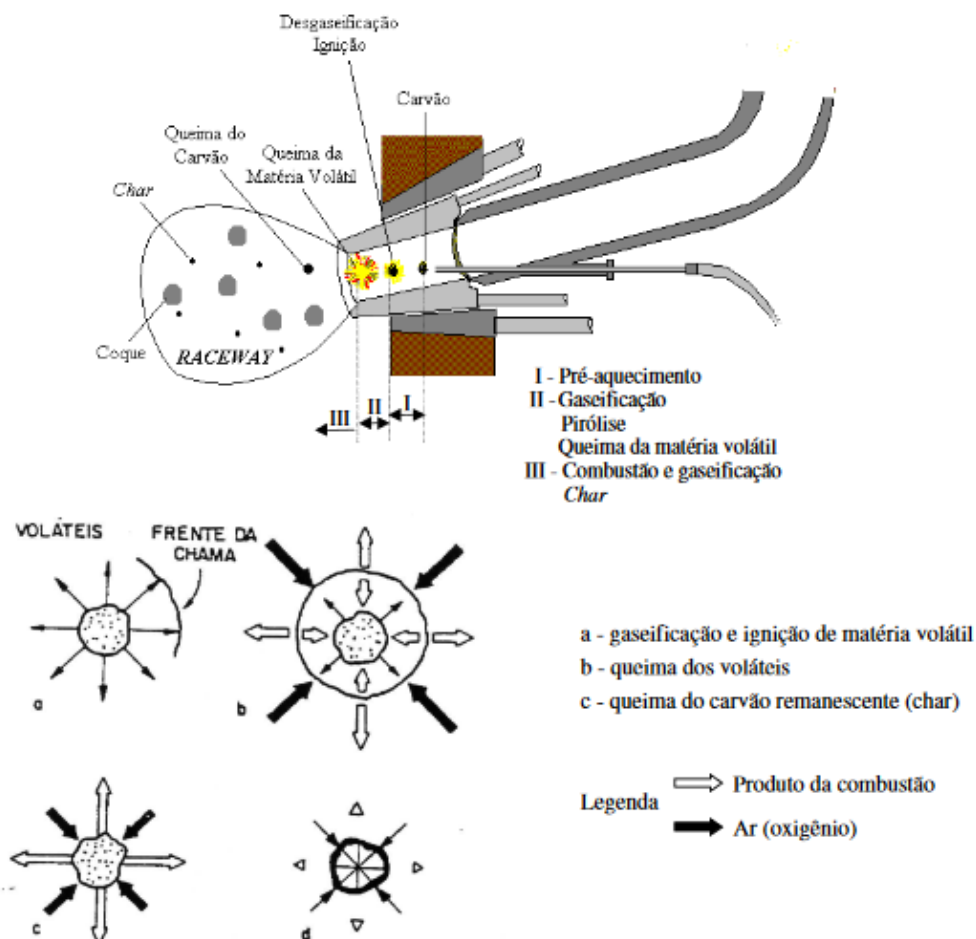


Figura 3.5 - Descrição esquemática de uma partícula de carvão, segundo FERNANDES (2007).

O pré-aquecimento das partículas de carvão segundo RECH (2018) ocorre por radiação do ar quente injetado nas ventaneiras do alto-forno. Como as finas partículas de carvão encontram-se bem dispersas devido ao regime turbulento, essa primeira etapa ocorre em poucos milissegundos. Ao atingir uma temperatura próxima de 400°C ocorre a pirólise das partículas de carvão com liberação dos voláteis. Novamente, devido ao regime fortemente turbulento, as moléculas de voláteis rapidamente se misturam com o oxigênio do ar, dando início à sua combustão. Tais reações quase que instantânea de queima liberam grande quantidade de calor que será responsável pela ignição do char

através do oxigênio do ar que passa pelo processo de difusão através dos poros criados nas partículas de carvão durante a pirólise e liberação dos voláteis.

A combustão do char é significativamente mais lenta do que a dos voláteis e não se completa durante o seu curto tempo de residência na zona de combustão do alto-forno. A figura 3.5 conforme relatado por NARUSE et al (2000) e adaptado por RECH (2018) ilustra o sequenciamento do processo de combustão do carvão de PCI injetado no alto-forno.

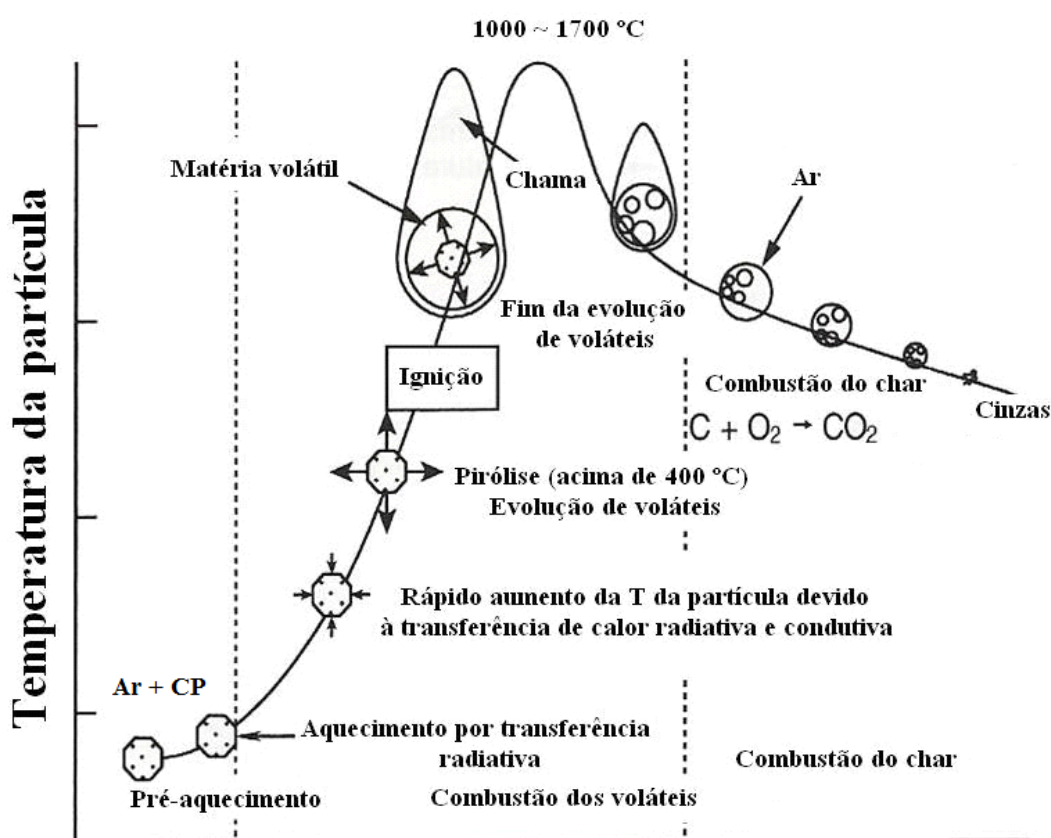


Figura 3.6 - Evolução do processo de queima das partículas de carvão de PCI injetado no alto-forno.

De acordo com CARPENTER (2006) a pirólise e a combustão dos voláteis iniciam ainda nas ventaneiras, onde rapidamente ocorre a liberação de 80 a 90% dos gases, os demais 20 a 10% ocorrem um pouco depois, já dentro do *raceway*. Na primeira fase da pirólise é liberado alcatrão, alifáticos, CO_2 e H_2O , já na segunda fase da pirólise é liberado preferencialmente CO e H_2 . Metano pode também ser liberado nas duas fases.

Após a rápida liberação dos primeiros gases, ocorre o contato com oxigênio do ar quente injetado nas ventaneiras dando início às reações de combustão, conforme figura 3.7.

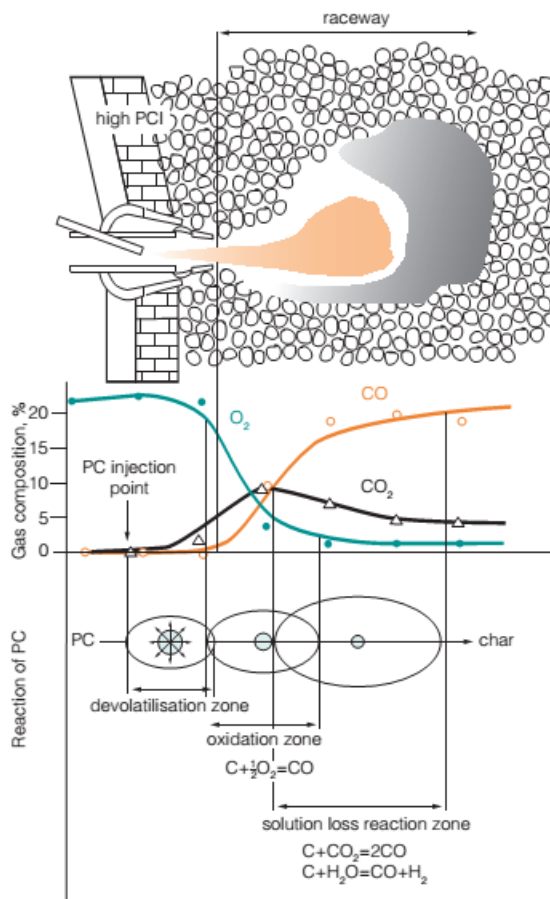


Figura 3.7 - Evolução da composição química dos gases gerados no *raceway* segundo CARPENTER (2006).

3.5 Fatores que influenciam na combustão do carvão

Vários estudos sobre a combustibilidade de carvões de PCI convergem sobre fatores que influenciam nesse mecanismo, sendo divididos nos principais grupos:

- Propriedades físicas e químicas dos carvões, tais como teor de voláteis e estrutura cristalina do char, segundo KHAIRIL et al (2001);
- Condições operacionais do *raceway*, tais como a temperatura do ar soprado, enriquecimento de oxigênio e taxa de injeção de carvão pulverizado;
- Condições operacionais do alto-forno, tal como o perfil de distribuição de carga e conseqüentemente o perfil de escoamento do gás de ascensão;

- Condições operacionais da planta de PCI, tais como: granulometria do carvão, tipos e posições das lanças de injeção nas ventaneiras de altos-fornos.

De acordo com SILVA (2006), para que os benefícios decorrentes de injeção de carvão possam ser bem aproveitados é objetivado que este carvão queime integralmente dentro da zona de combustão. Para atingir esse estágio operacional é necessário buscar condições que acelerem esse processo de queima.

HUTNY et al. (1991) cita que as condições de combustão, entre elas a taxa de injeção tem influência na eficiência de combustão dos carvões injetados.

Al-OMARI (2004) relata que a combustão incompleta do carvão é o obstáculo técnico mais importante para a operação com altas taxas de PCI, uma vez que o tempo de residência disponível para a combustão do carvão é muito curto.

Segundo BABICH et al. (1996), um dos principais fatores que dificultam o aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado no alto-forno é a sua gaseificação não ser completa dentro da zona de combustão.

De acordo com GEERDES et al. (2009) o carvão possui um tempo de residência muito curto na região de combustão, cerca de 5 milissegundos. Logo, para a garantia de um bom desempenho do processo de queima é necessário adaptação nas condições de combustão, tal como garantir uma mistura adequada de carvão e oxigênio de sopro.

SILVA (2006) mostra a dependência da eficiência de combustão com as variáveis de processo, conforme figura 3.8.

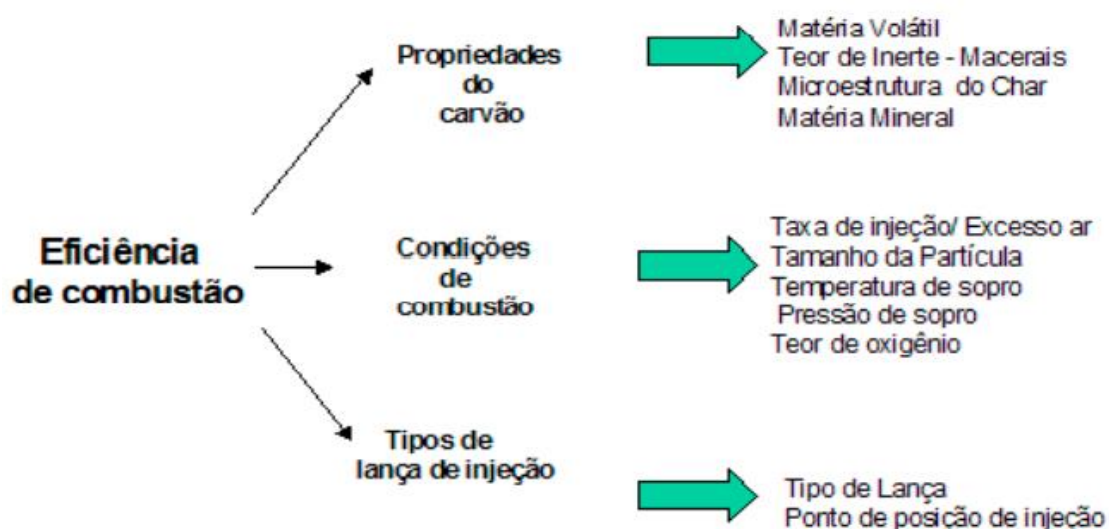


Figura 3.8 - Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo segundo SILVA (2006).

3.6 Eficiência da combustão do carvão de PCI no alto-forno

Segundo NG et al. (2016), a exposição de partículas de carvão a temperaturas muito elevadas ao saírem das ventaneiras, tipicamente em torno de 1.100°C as leva a transformações estruturais muito rápidas devido os fenômenos de amolecimento, inchamento causado por liberação de gases, ressolidificação e eventual ruptura das partículas. Esses ciclos, somados às características físicas, químicas e macerais dos carvões formam materiais carbonosos (Char e fuligem) que podem não sofrer combustão durante a rápida residência no *raceway*.

A provável combustão incompleta do carvão injetado nas ventaneiras leva a dificuldades operacionais no alto-forno, pois parte dos materiais carbonosos não queimados podem acumular no interior do forno bloqueando a passagem do gás ascendente das ventaneiras em direção ao topo, causando problemas de permeabilidade e consequentemente perda de produção de ferro-gusa.

FERNANDES (2007) afirma que a combustão completa do carvão no *raceway* é bastante improvável, por questões ligadas à cinética do processo, principalmente

quando se injeta taxas elevadas de carvão no alto-forno. O problema passa, então, a ser o que ocorre com a parcela de carvão não totalmente queimada no *raceway* e que permanece no interior do alto-forno.

Como o tempo de residência do carvão na região do *raceway* é muito curto, parte de finos de char deixa a zona de combustão sem ter reagido, esse material pode ser depositado após a zona de combustão, numa região chamada de “ninho de pássaro” (*bird's nest*), formada por finos de coque e gotas de escória e gusa fundidos, caracterizada por baixa permeabilidade ao fluxo gasoso. O aumento do ninho de pássaro causa um aumento na região inativa do forno, e uma redução na penetração da zona de combustão, o que favorece um maior fluxo periférico dos gases ascendentes e aumenta as perdas térmicas pelo gás de topo (CASTRO e TAVARES, 1998).

Além da formação de *bird's nest*, a maioria do carvão que não sofreu combustão no *raceway* é carregado para partes superiores do alto-forno. De acordo com CARPENTER (2006), parte desse material tende a se acumular em regiões onde ocorrem grandes mudanças no fluxo de gás, tais como na zona coesiva. Nessas regiões o char participará da reação conhecida como *Solution loss* em substituição parcial ao coque, conforme abaixo:



Uma outra parte menor do char não reagido no *raceway* é carregada principalmente pelo centro do alto-forno pelo gás ascendente. Essa parcela não participa das reações químicas e será depositada no sistema de limpeza de gases.

De acordo com NG et al. (2016), os materiais carbonosos encontrados no pó de topo dos altos-fornos podem ser classificados em 3 categorias, nomeadamente char, coque e fuligem. Tanto o char quanto a fuligem se originam da pirólise muito rápida do carvão injetado nas ventaneiras, a figura 3.9 ilustra a morfologia do char e da fuligem.

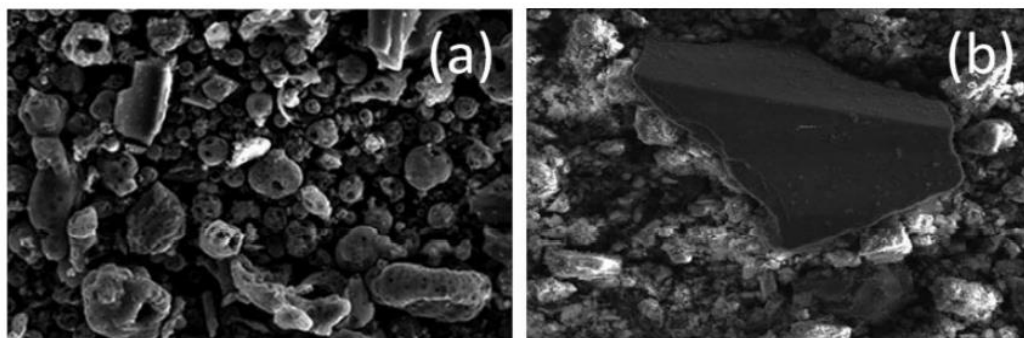


Figura 3.9 – (a) Morfologia de char e fuligem: uma estrutura cenosférica de char; (b) partícula de fuligem na amostra de poeira industrial, segundo NG et al (2016).

De acordo com NG et al (2016), a fuligem é um material muito menos reativo quando comparado ao char, isso se deve à sua estrutura ser altamente cristalina. Uma vez que a fuligem escapa sem reagir no *raceway*, torna-se muito difícil a sua gaseificação e conseqüentemente a sua combustão nas partes superior do alto-forno pois essas regiões são relativamente frias.

Elevadas taxas de injeção de carvão apresentam maior tendência de geração de fuligem, pois nem todas as partículas de carvão conseguem passar por todas as etapas envolvidas na combustão do carvão, acarretando maior arraste de finos de carvão para partes superiores do alto-forno.

Além das possíveis dificuldades operacionais acarretadas pelo grau da combustão incompleta do carvão, problemas ambientais também devem ser avaliados, uma vez que a geração de pó de topo pode ser aumentada com a diminuição da eficiência de combustão. É importante que a eficiência de combustão seja a maior possível de forma a evitar desperdícios financeiros. Para isso faz-se necessário um estudo criterioso dos percentuais em massa do carbono presente no pó de topo de alto-forno.

3.7 Métodos de avaliação da eficiência de combustão do carvão

Existe na literatura diferentes trabalhos desenvolvidos com o propósito de aumentar o conhecimento sobre a combustão do carvão no alto-forno. Alguns deles utilizam simuladores da zona de combustão do alto-forno em escala laboratorial para prever a eficiência de combustão do carvão, além de avaliar diferentes tipos de carvões quanto à combustibilidade. Métodos que permitem a contabilização da perda de massa em função do tempo e temperatura de diferentes amostras sob condições fixas de queima dá uma clara referência comparativa da performance entre um carvão e outro. Uma outra forma de avaliação se dá pela comparação da estrutura cristalina de resíduos da combustão através de microscopia ótica ou por microscopia eletrônica de varredura.

SILVA (2006), relata em seu trabalho que após a combustão do carvão com ar aquecido num simulador de queima, houve a geração de um resíduo, comumente chamado de Char. Pelo método de microscopia eletrônica de varredura foi possível correlacionar a eficiência de combustão com o teor de voláteis de cada carvão testado e a microestrutura dos respectivos resíduos gerados da combustão. Obtendo como resposta dos ensaios que a eficiência de combustão foi maior para carvões alto voláteis que geraram char mais poroso e menos espessos em relação àqueles com menor percentual de voláteis que geraram char com espessura superior.

WU et al (2008) avaliaram a eficiência de combustão de carvão de PCI injetado em um alto-forno da Shangai Baosteel group Co, China, através de análise microscópica. Nesse estudo foi contabilizado a área superficial de cada tipo de carbono em amostras de pó e lama do alto-forno em questão conseguindo-se separar a origem do carbono entre coque e carvão de PCI, possibilitando-os demonstrar que a quantidade de char não queimado ou parcialmente queimado elevou-se a medida que a taxa de injeção de carvão de PCI foi elevada. Um dos pontos cruciais para a correta execução desse ensaio está relacionada à necessária experiência dos laboratoristas na identificação das respectivas microestruturas com a correta origem do carbono, ilustrada pela figura 3.10:

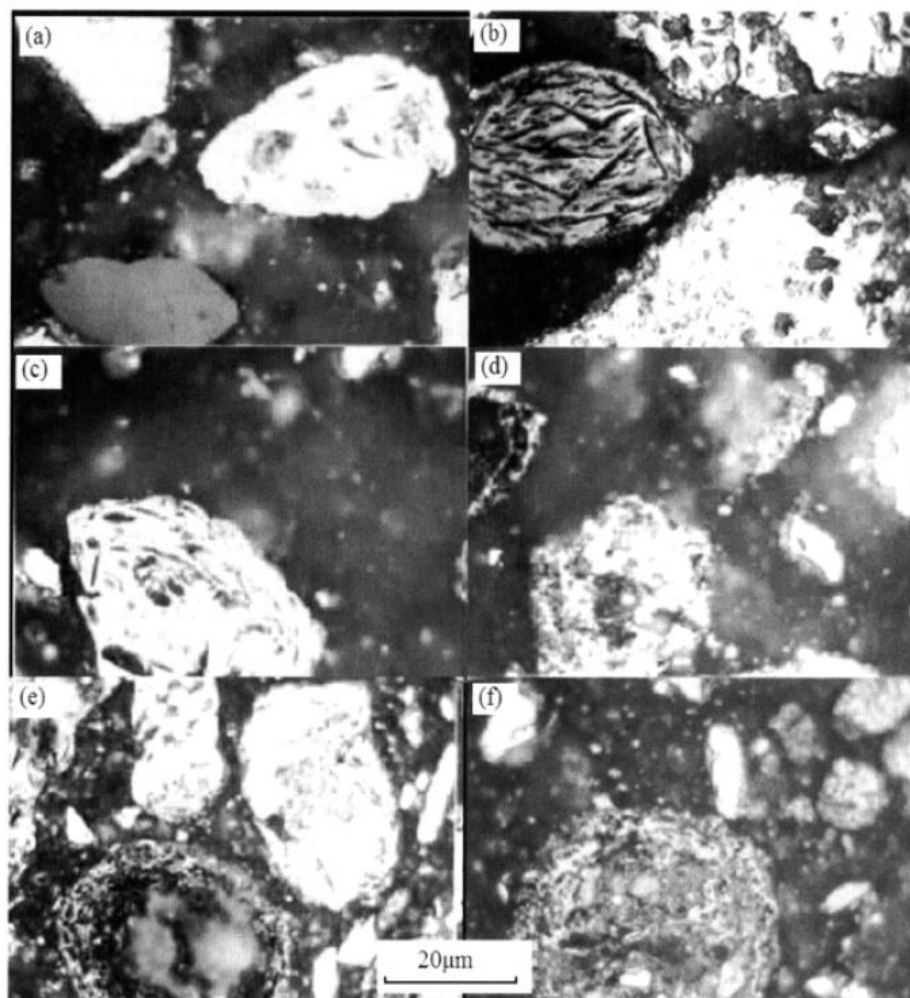


Figura 3.10 - Imagem de microestrutura de partículas de carbono de diferentes origens obtidas pelo microscópio DRMP RXP, segundo WU et al (2008).

YU et al (2014) analisaram amostras de pó de topo de dois altos-fornos com diferentes taxas de injeção de carvão de PCI (151 e 183kg/t) da Wuhan Iron and Steel Corporation, comparando os resultados com amostras de coque metalúrgico coletadas através de perfuração em pontos das cubas dos alto-fornos. A técnica utilizada foi análise de petrografia através de espectroscopia Raman, onde a morfologia e estrutura dos materiais carbonosos do pó de topo de alto-forno foi comparada às análises de coque e de char sintético. O estudo conclui que a técnica de espectroscopia Raman pode ser desenvolvida para o monitoramento eficiente e preciso para fins de diferenciação entre finos de coque e carvões em pó de topo de alto-forno.

Além de técnicas laboratoriais, modelos estatísticos também são utilizados para inferir sobre a combustibilidade de diferentes carvões a diferentes condições operacionais de um alto-forno. FERNANDES (2007), utilizou o software *Statgraphics Plus*® de análise multivariável para determinar quais variáveis de um alto-forno impactam na eficiência de combustão do carvão pulverizado. Nesse estudo concluiu-se que a taxa de injeção de carvão impacta negativamente na eficiência de queima enquanto o teor de carbono dos carvões injetados impacta positivamente.

RECH (2018) cita que a grande dificuldade em comparar carvões e chars com relação à combustibilidade e reatividade no alto-forno se deve a não existir um teste padrão para avaliar estes parâmetros. Além disso, a obtenção de medidas experimentais da combustão de materiais sólidos nas ventaneiras e na zona de combustão do alto-forno esbarra em enormes dificuldades técnicas devido às condições hostis que prevalecem nessas áreas segundo MACHADO et al., (2013).

Técnicas de simulação em escala laboratorial são muito úteis, principalmente na determinação de qual tipo de carvão apresenta melhor reatividade, entretanto uma abordagem que inclua dados reais da indústria com os impactos de variáveis operacionais na eficiência de combustão deve ser levada em conta para uma melhor assertividade na compreensão dos fenômenos.

A unidade da ArcelorMittal em Hamilton, Canadá, em parceria com o Centro Canadense de Tecnologia Mineral e Energética, CanmetENERGY desenvolveu um método termogravimétrico de diferenciação de carbono para amostras de lama dos altos-fornos da respectiva planta. Na ocasião, foi verificado o impacto positivo do enriquecimento de oxigênio na menor geração de compostos carbonosos presentes na lama. Tal metodologia foi compartilhada internamente no grupo e foi a base para a condução desse trabalho.

Partindo da condição que as partículas de coque e carvão de PCI possuem morfologia e estruturas cristalinas diferentes entre si e considerando que a parcela de carvão não reagido presentes no pó e na lama foram submetidas a condições termomecânicas que

conferem ao carbono diferentes graus de organização, resultando em características de combustão única e distinguíveis, o método termogravimétrico permite diferenciar a origem dos compostos carbonosos (coque, char e fuligem) a partir da medição de perda mássica de amostras de pó coletadas no topo do Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade em diferentes patamares de temperatura em ensaios termogravimétricos.

As temperaturas de início de combustão do char e da fuligem foram estudadas por NG et al (2019) a partir de amostras de resíduos carbonosos obtidos de ensaios de combustão de carvões de PCI em um reator em escala piloto no Centro Canadense de Tecnologia Mineral e Energética, CanmetENERGY que simulou a queima do carvão em condições próximas às do *raceway* de um alto-forno, tais como: temperatura de sopro, enriquecimento de oxigênio e tempo de residência das partículas de carvão na zona de combustão. Após a combustão de várias amostras de vários tipos de carvões de PCI nesse reator, os resíduos coletados foram avaliados em ensaios termogravimétricos chegando-se à definição das temperaturas típicas de combustão do char e da fuligem.

Segundo NG et al (2016) os diferentes compostos carbonosos que deixam o alto-forno através do topo possuem temperaturas típicas de início de combustão, entretanto, o char e o coque iniciam a reação de queima em temperaturas próximas a 400°C, diferentemente da fuligem que inicia a reação acima de 600°C.

Para contornar a dificuldade na diferenciação do char e coque causados pelo início simultâneo da combustão de ambos os compostos, NG et al., (2016) propõe o peneiramento das amostras dividindo-as em duas outras com frações granulométricas diferentes, numa malha de 100mesh. O motivo da divisão da amostra em duas frações se dá pelo fato de que mais de 98% do carvão pulverizado injetado nas ventaneiras do Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade possui granulometria inferior a 100mesh. Como as partículas de carvão injetados nas ventaneiras passam por processos de desvolatilização, ruptura em fragmentos menores e eventualmente combustão parcial é absolutamente esperado que as partículas de carvão que são arrastadas para o topo do alto-forno possuam granulometria inferiores à 0,149mm (100mesh). Logo, o material com granulometria superior a 100mesh apresenta carbono com origem somente do coque, enquanto o carbono na parcela abaixo de 100mesh tem origem do coque, e do

carvão de PCI. O fracionamento utilizado para a separação parcial dos compostos carbonosos é representado na figura 3.11:

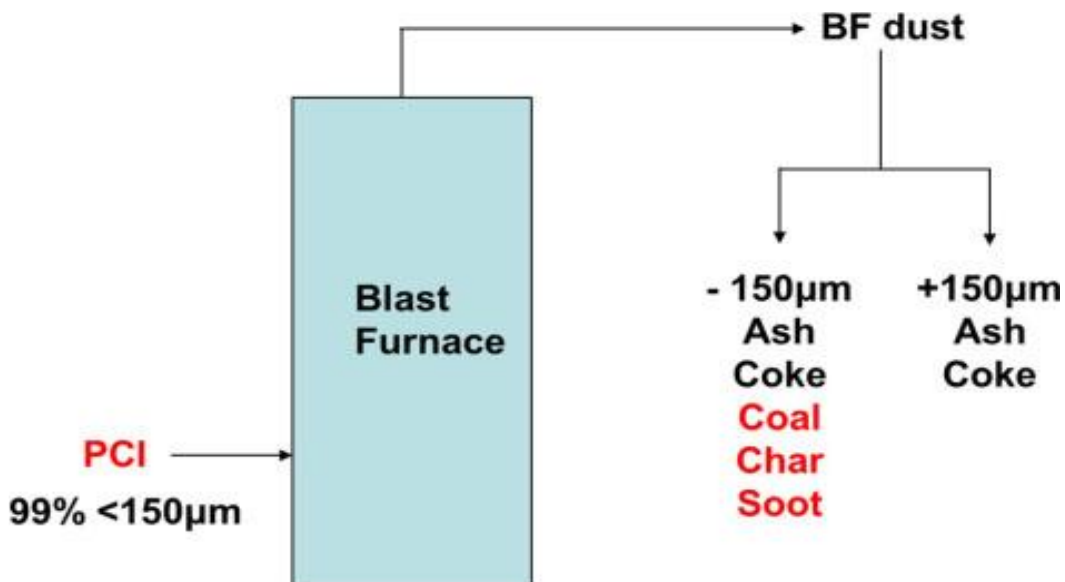


Figura 3.11 - Divisão de resíduos carbonosos do pó de topo de alto-forno em função de sua granulometria, adaptado de NG et al., (2016).

Pelo fracionamento da amostra é possível analisar a curva TGA para o coque presente na fração grosseira e considerar a taxa de perda de massa da fração grossa igual a presente na fração fina. Tal procedimento permite então solucionar a sobreposição das curvas TGA do coque e char e obter assim a perda de massa do segundo material, conforme ilustrado na figura 3.12:

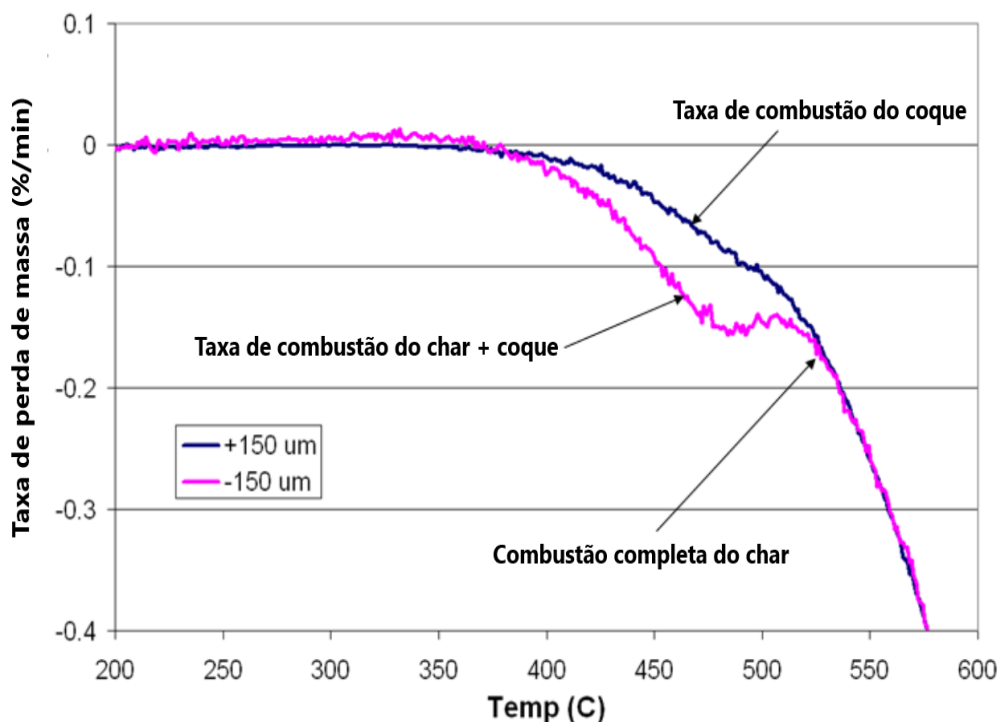


Figura 3.12 - Perfil de combustão de amostras de lama de alto-forno com granulometria maiores e menores que 150μm de acordo com NG et al (2016).

Dessa forma, a taxa de perda de massa para o char será igual a: taxa de perda de massa da amostra com granulometria menor que 150μm – taxa de perda de massa da amostra com granulometria maior que 150μm. Equação aplicada à faixa de temperatura de 300 a 600°C.

A figura 3.13 ilustra uma curva TGA de amostra de lama de alto-forno nos ensaios realizados para a ArcelorMittal Dofasco, Canadá. A área que representa a combustão de cada tipo de carbono (char, coque, fuligem) na amostra é mostrada em cores distintas, segundo NG et al (2016).

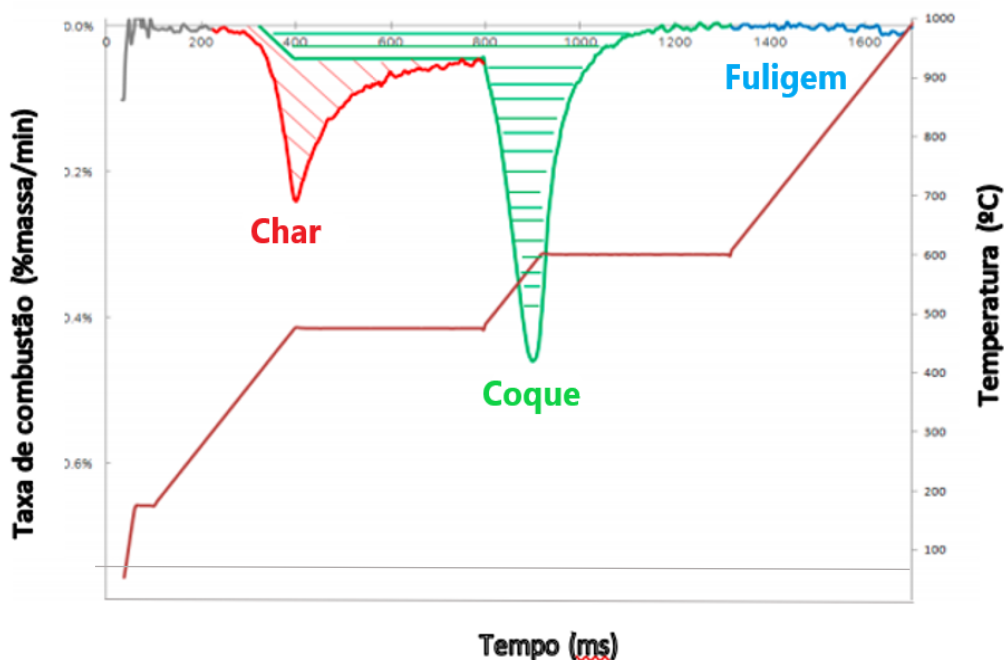


Figura 3.13 - Curva termogravimétrica para lama de alto-forno.

A metodologia de diferenciação de carbono de pó e lama de alto-forno proposta por NG et al (2016) e compartilhada com a ArcelorMittal Dofasco no Canadá apresentou boa confiabilidade e repetibilidade, além de ser relativamente menos complexa e mais barata em comparação com outros métodos propostos em literaturas para o estudo da combustibilidade de carvões em altos-fornos. Esse conjunto de fatores motivou a replicação do estudo na ArcelorMittal Monlevade. Entretanto, implementações no estudo predecessor serão realizadas com o intuito de aplicar o método criado para medir o impacto de outras variáveis na combustibilidade do carvão no *raceway*. No caso em questão, o estudo envolverá o efeito da taxa de injeção de carvão de PCI na eficiência de combustão.

No estudo predecessor realizado por NG et al (2016) foram analisadas amostras de lama do alto-forno da ArcelorMittal Dofasco que operava a uma taxa de injeção fixa e igual a 140kg/t. Já o objetivo do estudo na ArcelorMittal Monlevade será avaliar a eficiência de combustão do carvão no *raceway* para taxas de injeção que variam de 130 a 190kg/t mantendo-se os demais parâmetros operacionais do alto-forno com a menor variação possível.

Outra diferença em relação ao realizado na planta da ArcelorMittal Dofasco está no fato de que o estudo realizado na ArcelorMittal Monlevade avaliará todo o resíduo sólido gerado no topo do alto-forno e não apenas na lama. Para isso, o ponto de coleta das amostras ocorrerá antes do sistema de limpeza de gases, em um dos *uptakes* do Alto-forno A com o intuito de obter maior representatividade e evitando eventuais perdas de informações relacionadas as diferenças entre os equipamentos nas duas siderúrgicas.

4. METODOLOGIA

4.1 Desenvolvimento do projeto

A usina siderúrgica da ArcelorMittal Monlevade possui um laboratório contratado para realizar a análise química do pó gerado no sistema de limpeza de gases do alto-forno A. Tal laboratório utiliza o método infravermelho para determinação do carbono total e o método gravimétrico para determinação das cinzas do pó do sistema de limpeza de gases do Alto-Forno A, entretanto, esse método fornece apenas o teor total de carbono do pó, não sendo capaz de diferenciar a sua origem (coque ou char de carvão não reagido). Para a obtenção dessas informações será utilizado o método termogravimétrico para a distinção dos diferentes compostos carbonosos que saem do topo do Alto-forno A.

O estudo objetivou quantificar se haverá ou não elevação dos teores de char e fuligem através de amostras de pó de topo coletadas em cenários operacionais do Alto-forno A com diferentes taxas de Injeção de carvão de PCI, sendo elas: 130, 150, 160, 170, 180 e 190 kg/t.

Para cada uma dessas taxas, será objetivado manter os parâmetros operacionais do Alto-Forno A o mais estável possível, sendo eles:

- Enriquecimento de oxigênio em 3%;
- Vazão de ar quente soprado em 135.000Nm³/h;
- Temperatura de sopro em 1.100°C;
- Injeção de vapor de água entre 18 a 22g/Nm³ de ar soprado;
- CSR em 66% e tamanho médio do coque metalúrgico em 35mm;
- Composição da carga metálica em torno de 90% sínter, 6% minério granulado e 4% pelota;
- Granulometria do carvão mineral injetado com mínimo de 75% < 200mesh;

4.2 Amostragem e preparação do pó de topo de alto-forno para ensaios termogravimétricos

O pó gerado no processo do Alto-Forno A da ArcelorMittal Monlevade é composto majoritariamente por carbono e óxidos metálicos e possui granulometria que varia entre 1mm a valores menores que 0,074mm.

O carvão injetado nas ventaneiras do Alto-Forno A em Monlevade possui em média 98% < 0,150mm e historicamente, o primeiro estágio da limpeza de gases apresenta aproximadamente 20% <0,150mm, o que induz a uma interpretação que as partículas do carvão não-reagido no *raceway* se depositam preferencialmente na lama de alto-forno, segundo estágio da limpeza de gases. No entanto, visando uma melhor representatividade do estudo de combustão do carvão injetado nas ventaneiras do Alto-forno A, optou-se por coletar amostras antes do sistema de limpeza de gases, obtendo-se com isso uma amostragem de toda a faixa granulométrica do pó.

A amostragem será feita de forma contínua ao longo de 24 horas para cada cenário de taxa de injeção de carvão de PCI, através de uma tomada (tubulação metálica) conectada numa extremidade em um dos *uptakes* do alto-forno com a outra extremidade acoplada a um ciclone que fará a separação do gás e do pó, conforme a figura 4.1.

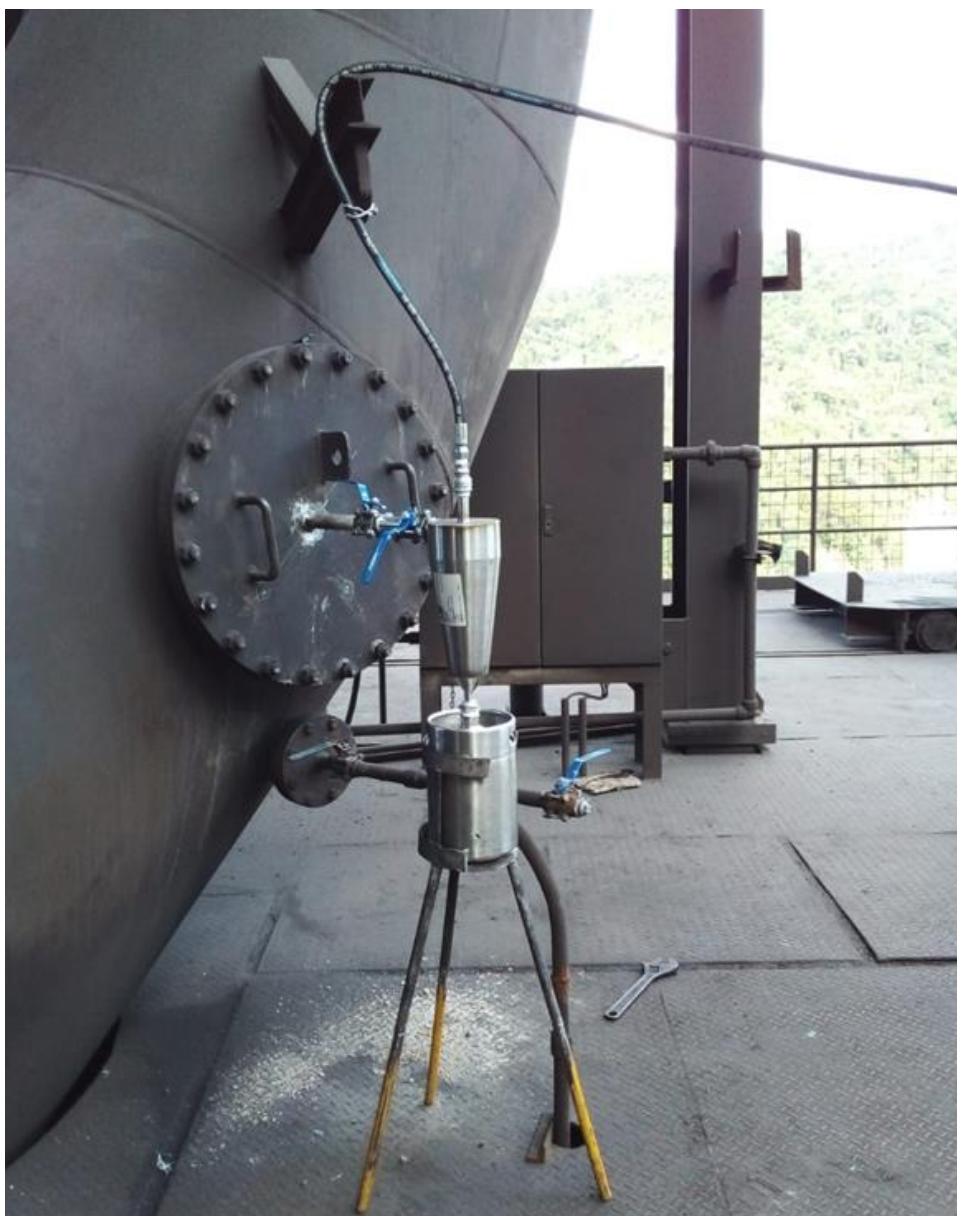


Figura 4.1 - Amostragem do pó no topo do Alto Forno A.

O ciclone foi projetado para amostragem de pó em gases com capacidade de separação das frações granulométricas com até $5\mu\text{m}$. Para obter máxima eficiência de separação, o fabricante sugere que o ciclone trabalhe com vazões maiores que $5\text{m}^3/\text{h}$. Segundo o fabricante Paul Gothe, o ciclone tem capacidade de operar com concentrações de pó de até $500\text{g}/\text{m}^3$, valor esse mais de 50 vezes o esperado no gás de alto-forno. A figura 4.2 mostra a curva de eficiência de separação de pó e gás, nota-se que para partículas maiores que $5\mu\text{m}$ a eficiência de separação é muito próxima de 100%.

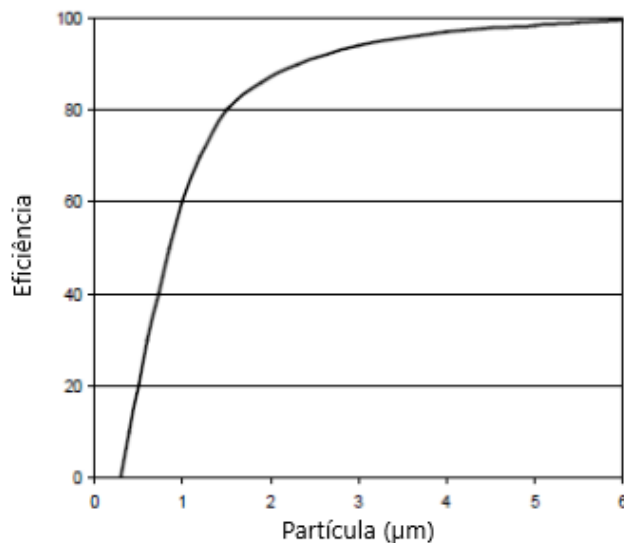


Figura 4.2 - Gráfico de eficiência de separação do ciclone para vazão de 5m³/h.

O ciclone a ser utilizado para a coleta de amostras é confeccionado em aço inox e juntas de vedação cerâmicas para resistir as condições extremas de temperatura, pressão e compostos químicos. O recipiente de amostragem, localizado na base do ciclone, possui capacidade para amostrar acima de 24h contínuas, dependendo da concentração e densidade do pó. A figura 4.3 ilustra o conjunto para coleta de amostras.



Figura 4.3 - Modelo do ciclone para coleta de pó de topo de alto-forno.

Será objetivado a coleta das amostras em períodos de operação estável do alto-forno, de forma a evitar que distúrbios operacionais impactem na interpretação do estudo da eficiência de combustão do carvão.

As amostras serão enviadas ao laboratório do centro de pesquisa da ArcelorMittal Brasil, onde ocorrerá a sua preparação, seguindo as etapas de quarteamento, secagem e peneiramento, até gerar uma massa de aproximadamente 50 gramas/alíquota para o ensaio termogravimétrico.

Para homogeneização e quarteamento das amostras brutas para formação das alíquotas de 50 gramas, será utilizado a técnica de tombo e empilhamento Chevron em uma superfície plana. A execução da atividade começa puxando uma extremidade da diagonal em direção a diagonal oposta, fazendo com que a massa de amostra tombe em direção a esta última, esse processo é repetido mudando de diagonal em sentido horário ou anti-horário até completar dezesseis tombos. Ao término da homogeneização o material é disposto em forma de cone para em seguida realizar o quarteamento pela divisão da amostra em quatro partes retirando duas posicionadas em locais opostos.

Após o quarteamento por tombo, é realizado o empilhamento Chevron de forma a distribuir o material em várias camadas por um comprimento aproximado de 30cm. As pontas da pilha são descartadas e a região central dividida para coleta.

As amostras a serem analisadas são identificadas e colocadas em uma estufa a 110°C por duas horas para secagem. Após secagem, as amostras são peneiradas em malha de 100mesh por um tempo de 15min. O material retido e passante na malha de 100mesh é retirado com auxílio de um pincel e pesado. Após isso, alíquotas de 50 gramas são retiradas para o ensaio termogravimétrico. Cada amostra é identificada com as datas da coleta, granulometria e armazenado para subsequente análise.

4.3 Método termogravimétrico

De acordo com DENARI et al., (2012) a análise termogravimétrica é a técnica que acompanha a variação de massa da amostra em função da programação de temperatura, sendo a técnica termoanalítica que acompanha a perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo ou temperatura.

A figura 4.4 apresenta um diagrama esquemático de um equipamento de termogravimetria genérico:

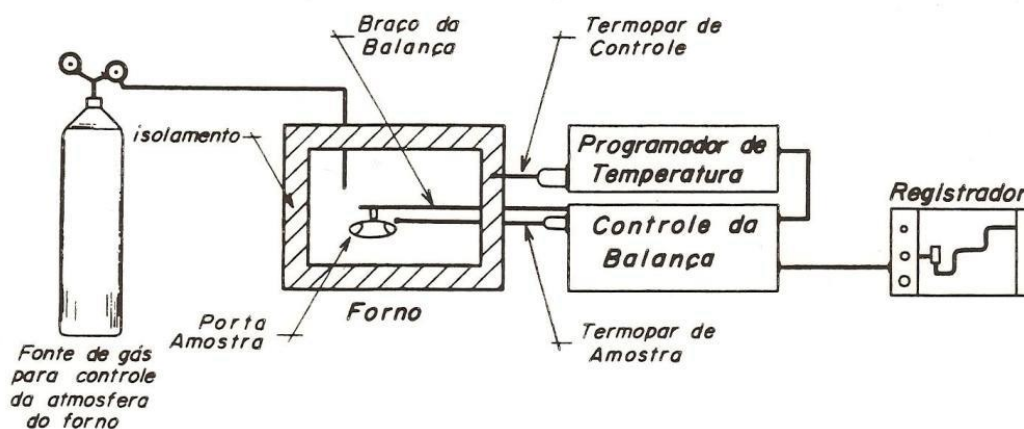


Figura 4.4 - Diagrama de um equipamento para análises termogravimétricas, segundo DENARI et al (2012).

Para o estudo em questão, o ensaio termogravimétrico será realizado num equipamento Perseus® STA 449 fabricado pela Netzsch conforme figura abaixo:

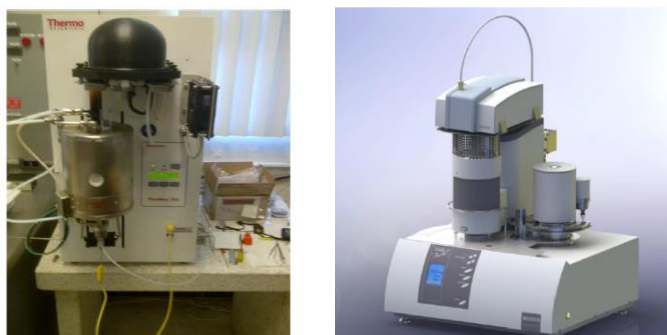


Figura 4.5 - Equipamento Perseus® STA 449.

O equipamento Perseus® STA 449 possibilita análises gravimétricas e calorimétricas de forma simultâneas, além disso possui automação completa com capacidade de controle de gases, temperatura e troca de amostras.

O equipamento é composto por um cadinho aquecido por dissipação de energia térmica de um resistor elétrico onde a amostra de pó é colocada sobre uma micro balança para a contabilização da perda de massa. O cadinho possui medição de temperatura e uma interface com um processador para registro dos dados durante os testes e para o controle da curva de temperatura de aquecimento do cadinho. Adicionalmente, o equipamento possui entradas de gases e fluxômetros de massa, podendo simular um ar atmosférico, a partir de N₂ e O₂ alta pureza, com uma vazão fixa de 10l/min usado para a combustão da amostra. O excesso de oxigênio é desejado para a combustão completa. O método de aquecimento TGA usa patamares isotérmicos para queimar completamente cada tipo de carbono, ou seja, carvão, coque e fuligem.

Tabela IV. 1 - Tabela com principais características da Perseus® STA 449.

STA 449	Design de carregamento superior
Faixa de temperatura	-150 ° C a 2000 ° C
Talha de forno motorizado	Um forno + trocador de amostra automático
Taxa de aquecimento	0,001 a 50 K / min
Sensores	TGA, TGA-DTA, TGA-DSC, TGA-DSC (cp)
Atmosferas	Inerte, oxidante, estático, dinâmico, vácuo
Trocador de amostra automático (ASC)	20 posições de cadinho
Controle de fluxo de gás	3 controladores de fluxo de massa
Resolução de temperatura	0,001 K
Resolução de peso	0,025 µg
Carga máxima de amostra	5000 mg (corresponde à faixa de pesagem)
Volume de amostra (máx.)	TGA: até 5 ml / DSC: 0,19 ml / DTA: 0,9 ml

A taxa de aquecimento das amostras de pó no cadinho do equipamento Perseus® para o ensaio termogravimétrico é controlada seguindo os estágios mostrado na tabela IV.2 e na figura 4.6, segundo NG et al (2016).

Tabela IV. 2 - Parâmetros TGA para Teste de Diferenciação de Carbono de Pó e Lama de alto-forno.

Passos	Min. Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo Patamar (h)
Umidade	25	175	5	0.5
Char	175	475	1	6.5
Coke	175	600	1	5.5
Fuligem	600	1000	1	1

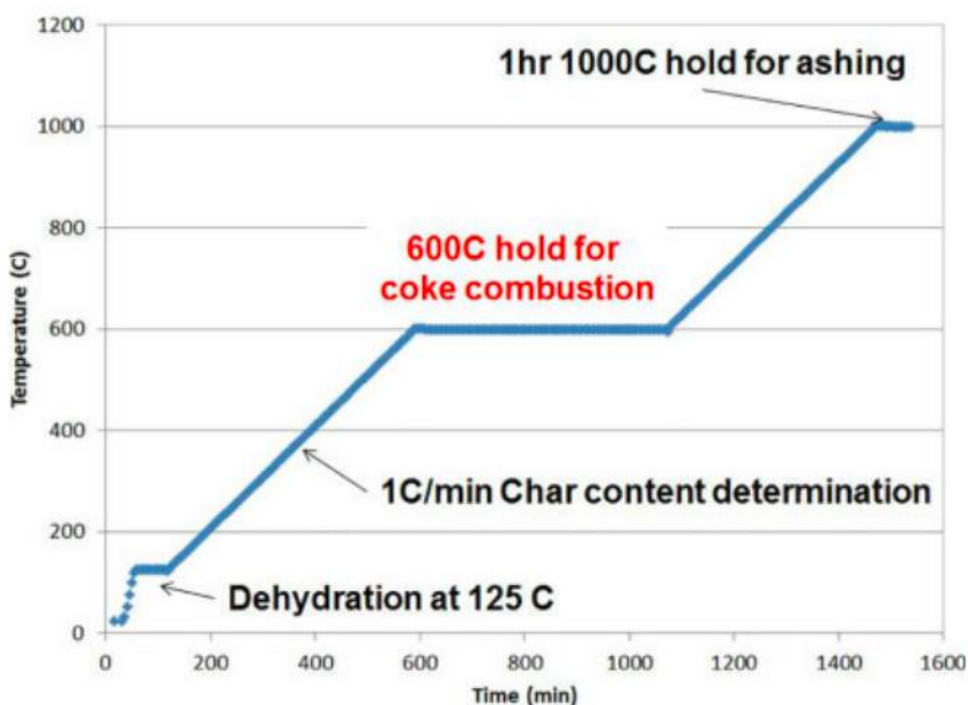


Figura 4.6 - Curva de temperatura x tempo para um ensaio termogravimétrico segundo NG et al., (2016).

A quantificação (em percentual) de cada carbono é feita pelo cálculo da área sobre a curva da taxa de perda de massa obtidas pelo ensaio termogravimétrico, conforme figura 4.7. Para o cálculo, a curva é dividida em seções com base na taxa de aquecimento e no comportamento de combustão da amostra. Estes são alinhados com cada um dos três tipos de carbono.

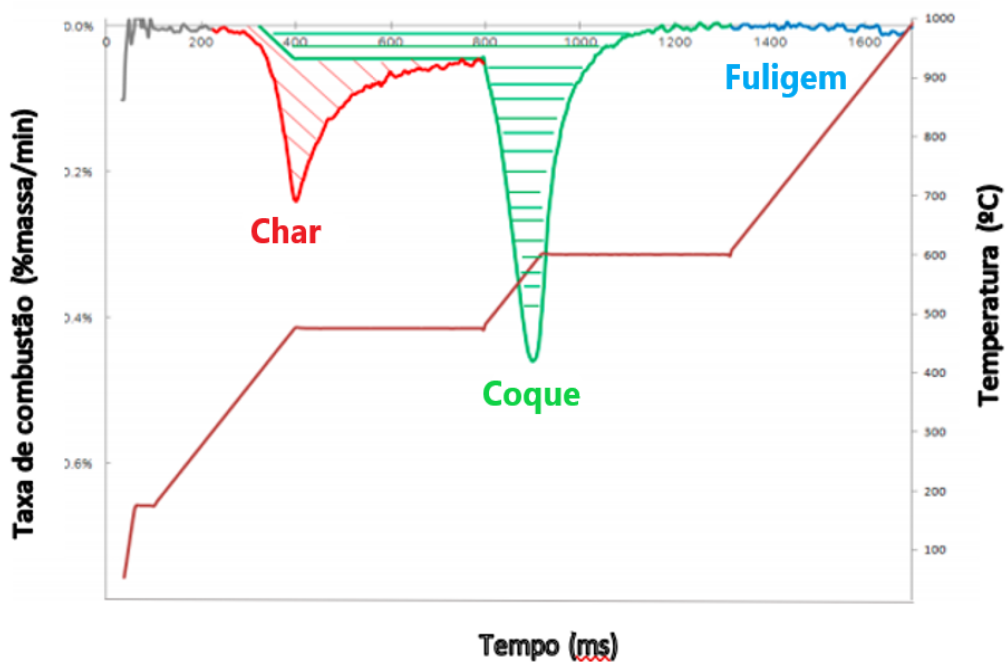


Figura 4.7 - Curva termogravimétrica para lama de alto-forno, segundo NG et al (2016)

Os resultados obtidos de cada carbono para cada cenário de taxa de injeção foram tabelados junto com os parâmetros operacionais do alto-forno, tais como: temperatura de sopro, enriquecimento de oxigênio, temperatura teórica de chama, calculada pela equação 4.5, abaixo, e granulometria do carvão injetado a fim de se avaliar a eficiência de combustão.

$$T_{\text{chama}} = 1741 + (0,65 \cdot TS - 5 \cdot US + 30 \cdot EO_2 - TIP) \cdot 2,032 \quad (4.5)$$

Onde:

- T_{chama} é a temperatura teórica de chama;
- TS é a temperatura de sopro;
- US é a umidade de sopro;
- EO_2 é o enriquecimento de oxigênio;
- TIP é a taxa de injeção de carvão pulverizado.

Para a inferência da eficiência de combustão, foi considerado o percentual de char + fuligem obtidos dos ensaios termogravimétricos. Esses percentuais, para cada cenário de taxa de injeção de carvão, foram multiplicados pela partição da fração das amostras menor que 100 mesh, e por fim, multiplicados pela geração relativa de material no sistema de limpeza de gases do Alto-forno A no dia das coletas, conforme equação 5. Como a geração do material no sistema de limpeza de gases é obtido via pesagem e dividido pela produção de gusa, tem-se como unidade, kg/t de gusa.

$$[(\%char + \% fuligem) \times (\text{peso do material passante em } 100\text{mesh}) / (\text{peso da amostra bruta})] \times \text{geração de resíduo do SLG.} \quad (4.6)$$

Pela comparação dos resultados obtidos para cada cenário de taxa de injeção de carvão de PCI será possível avaliar se há tendência ou não de perda de eficiência de combustão através da elevação ou não da quantidade de char e fuligem por tonelada de gusa produzido no alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir são provenientes da metodologia proposta neste trabalho para avaliação da eficiência de combustão do carvão injetado no Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade em função da taxa de injeção.

5.1 Resultados operacionais do Alto-forno A nos dias de coletas de amostras

Durante a amostragem de pó no topo do Alto-forno A, foi observado forte interferência da umidade do GAF no peso das amostras coletadas. A presença da umidade causou entupimento parcial ou total no sistema de amostragem, composto pela lança, ciclone e mangueira de descarte do GAF para a atmosfera. Uma forma encontrada para eliminar tal interferência foi restringir as coletas de amostras em dias com operação do Alto-forno A com temperatura de topo superior a 100°C, além disso, foi definido coletar amostras apenas em épocas secas, que ocorrem em Monlevade no período de maio a setembro. Por questões de segurança das pessoas, a realização da desobstrução e limpeza do conjunto de amostragem, quando entupimentos ocorriam, só foi permitido durante paradas programadas do Alto-forno A. Conseqüentemente, a ocorrência de entupimentos no sistema de amostragem limitou o número de amostras coletadas.

Outra dificuldade encontrada durante o estudo foram furos no ciclone utilizado para a separação do pó de topo com o gás de alto-forno. Tais furos se deram devido à característica abrasiva da mistura pó/gás. Para contornar essa adversidade, um novo conjunto de amostragem, incluindo lança e ciclone foi confeccionado com maior espessura de parede. Entretanto, esse problema causou atrasos na coleta de amostras, uma vez a sua substituição só foi possível com o Alto-forno A parado, ação necessária para proteger pessoas ao risco de projeção de exposição ao gás de alto-forno.

Adicionalmente, a dificuldade natural em manter vários parâmetros de processo estáveis a fim de se avaliar o impacto apenas da taxa de injeção de carvão de PCI na sua eficiência de combustão, foi um outro limitador no número de amostras coletadas.

Por fim, o forte impacto no custo do gusa em cenários com baixa taxa de injeção de carvão pulverizado e elevado consumo de coque (coke rate), foi outro limitador na obtenção de um grande número de amostras obtidas para o estudo em questão.

Mesmo com as dificuldades expostas, foi possível a obtenção de dados em cenários de operação bastante estáveis do Alto-forno A conforme apresentado na tabela V.1.

Tabela V.1 - Dados operacionais do Alto-forno A nos dias de coleta de amostras de pó de topo.

Dados de processo do AFA								
Taxa de injeção (kg/t)	130	150	160	165	170	175	185	Desvio Padrão
Temperatura de sopro (°C)	1.099	1.062	1.114	1.100	1.109	1.108	1.109	17,5
Enriquecimento de oxigênio (%)	2,00	3,00	3,00	3,20	3,10	3,00	3,00	0,40
Injeção de vapor (g/Nm ³)	21	17	18	17	16,5	18	17	1,5
Temperatura de chama (°C)	2.143	2.127	2.136	2.132	2.132	2.106	2.100	16,0
Temperatura de topo (°C)	97	110	111	121	109	119	115	7,9
Granulometria do carvão injetado (<200 mesh)	77	77	75	80	74	77,5	75	2,0
Teor de voláteis do carvão injetado (%)	13,8	14,3	14,1	14,25	14	14,2	14,3	0,2
CSR do coque metalúrgico (%)	67	67	67	66,3	67,12	66,4	65,8	0,5
Relação carvão/(carvão + coque) (%)	24	30	33	34	34	35	36	4

Considerando a complexidade operacional de um alto-forno, os dados operacionais acima apresentam baixa variação para diferentes dias e cenários de coleta de amostras, o que permite uma boa avaliação do impacto da taxa de injeção na eficiência de combustão do carvão. A exceção ocorreu na variável enriquecimento de oxigênio, para o cenário de taxa de injeção de 130 kg/t, porém, isso é necessário para evitar temperatura de chama muito elevada, situação que pode acarretar transtorno

operacionais. Como esse foi o cenário de menor taxa de injeção de carvão avaliado, entende-se que um menor enriquecimento de oxigênio não afetará a queima do material injetado, situação que foi comprovada nos ensaios termogravimétricos e será apresentada adiante.

5.2 Resultados dos ensaios termogravimétricos

As amostras coletadas e preparadas passaram pelos ensaios termogravimétricos, onde ocorreram suas combustões, gerando as curvas de perda de massa em função do tempo e temperatura apresentados no anexo 1. Tais curvas forneceram os percentuais em massa de cada tipo de carbono (char, coque e fuligem), conforme apresentados na tabela V.2

Tabela V.2 – Resultados dos ensaios termogravimétricos de amostras do topo do AFA.

Dados dos ensaios termogravimétricos							
Taxa de injeção (kg/t)	Geração de resíduos no SLG (kg/t)	Char (%)	Fuligem (%)	Coque (%)	Fração da amostra <100 mesh pela amostra global (%)	Total carbono com origem do PCI da amostra global (%)	Total carbono com origem do PCI (kg/t)
130	12,7	30	4	66	18	7	0,84
150	9,26	63	8	29	44	33	3,03
160	14,98	49	6	45	23	14	2,14
165	18,25	24	17	59	34	12	2,24
170	15,40	45	11	44	29	18	2,80
175	17,0	36	7	57	29	13	2,21
185	18,6	72	7	21	16	16	3,03

Os percentuais de char, fuligem e coque se referem à quantidade relativa de cada material na porção abaixo de 100mesh. Já a coluna nomeada de “total carbono com origem do PCI da amostra global” se refere à soma do char e fuligem, multiplicados pela quantidade relativa da porção menor que 100mesh em relação à massa da amostra global. A soma de char e fuligem multiplicada pela coluna “total carbono com origem do PCI da amostra global” fornece o percentual total de carbono com origem no PCI que sai pelo topo do Alto-forno A. Multiplicando-se esse percentual pela geração de resíduos do SLG, obtém-se, o total de carbono oriundo do carvão injetado nas ventaneiras em kg/t.

A relação entre a taxa de injeção versus carbono do carvão não queimado que sai pelo topo do Alto-forno A é mostrado no gráfico apresentado na figura 5.1. Os rótulos de dados apresentados sobre cada ponto se referem ao número de amostras analisadas para cada cenário.

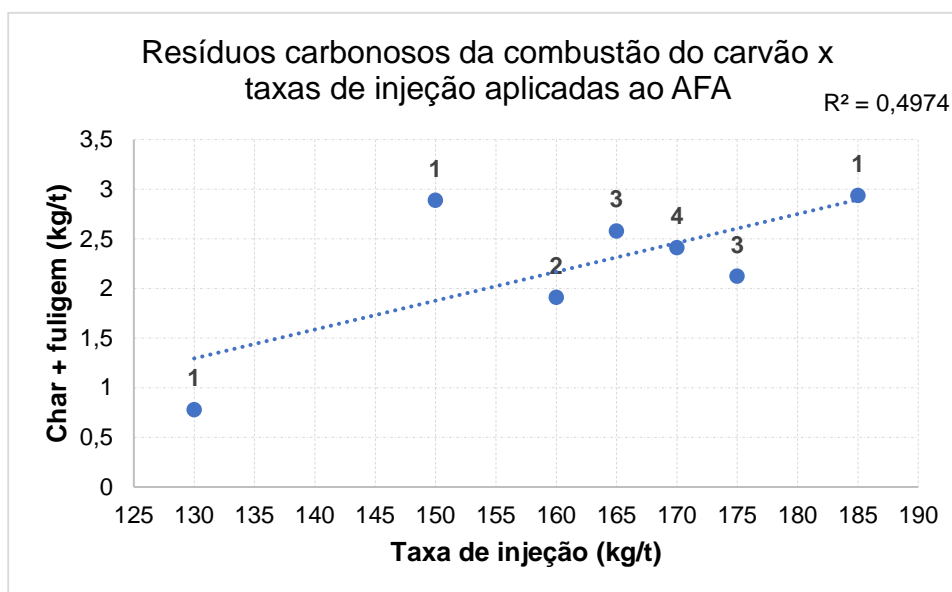


Figura 5.1 – Evolução dos resíduos carbonosos oriundos do PCI em função da taxa de injeção.

A figura 5.1 apresenta certa tendência de elevação dos resíduos carbonosos em função da taxa de injeção de carvão, com um coeficiente de correlação (R^2) de aproximadamente 50%, valor relativamente baixo, porém considerando a complexidade operacional de um alto-forno, pode ser entendido como razoável.

O ponto de maior dúvida se deu no cenário de taxa de injeção de 150 kg/t, porém, devido às dificuldades já citadas no processo de coleta de amostras e a restrições de custo operacionais, não foi possível obter mais dados nesse cenário para uma melhor avaliação.

Adicionalmente, o gráfico 5.1, evidencia perda de eficiência de combustão quando se compara o menor patamar de injeção, 130 kg/t, em relação ao maior patamar analisado,

185 kg/t. Entretanto, para valores intermediários, de 160 a 180 kg/t, a elevação dos resíduos carbonosos oriundos de combustão incompleta é pequena, menor que 1 kg/t, situação em concordância com publicações literárias, onde é citado que as maiores perdas na eficiência de combustão ocorrem para taxas acima de 190 kg/t.

5.3 Avaliação da eficiência de combustão versus geração de resíduos do sistema de limpeza de gases

A fim de se obter maior segurança na conclusão da análise sobre eficiência de combustão do carvão em função da taxa de injeção por intermédio dos ensaios termogravimétricos, foi avaliado a média anual do teor de carbono medido no sistema de limpeza de gases do Alto-forno A em função da taxa de injeção de carvão para o período entre 2016 a 2022, obtendo-se o gráfico presente na figura 5.2.

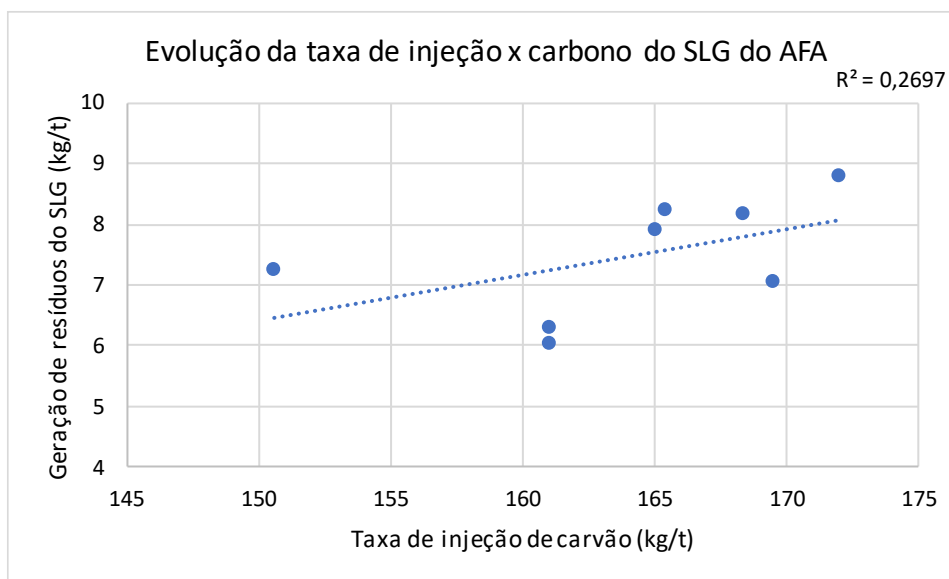


Figura 5.2 – Teor de carbono medido no SLG x taxa de injeção de carvão entre 2016 a 2022.

O gráfico 5.2 apresenta baixa correlação entre o teor de carbono medido no SLG x taxa de injeção de carvão, com um coeficiente de correlação (R^2) de aproximadamente 0,27. Além disso, os teores de carbono encontrados tiveram uma baixa amplitude de variação, encontrando-se numa faixa entre 6 a 9 kg/t. Mesmo que o histórico acima não possua

uma separação entre a origem do carbono (coque e PCI) é possível utilizar a informação como complementar ao estudo, fornecendo maior subsídio para a conclusão da análise.

6. CONCLUSÃO

O estudo da eficiência de combustão do carvão injetado no AFA em função da taxa de injeção mostrou que o teor de carbono oriundo da queima incompleta no *raceway* apresenta pouca variação para a faixa mais utilizada em Monlevade, compreendida entre 160 a 180 kg/t de carvão pulverizado injetado nas ventaneiras do AFA, resultando em um delta menor que 1 kg/t de carbono.

A maior variação nos teores de carbono oriundo da queima incompleta no *raceway* ocorreu entre os dois extremos avaliados, que correspondeu as taxas de 130 e 185 kg/t. Nessas condições, a elevação do teor de carbono foi de aproximadamente 2 kg/t, valor muito baixo perto do benefício operacional e de redução de custo trazido ao se elevar a taxa de injeção de carvão do menor para o maior patamar.

Mesmo com as dificuldades relacionadas às coletas de amostras, principalmente àquelas oriundas da umidade do gás de topo, limitando o número de pontos avaliados, deduz-se que a metodologia utilizada é suficiente para concluir que a perda de eficiência de combustão é quase nula para os patamares entre 160 a 180 kg/t, valores mais praticados no Alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade. Para suportar essa conclusão, considera-se que nas datas de amostragem do pó do topo, foi possível manter os principais parâmetros operacionais bastante estáveis, permitindo assim, a avaliação apenas do impacto da taxa de injeção na eficiência de combustão do carvão injetado no AFA. Outro subsídio importante para tal conclusão, foi o levantamento de dados históricos da geração de resíduos do SLG em função da taxa de injeção de carvão que além de apresentar pouca variação no teor total de carbono, aproximadamente 3 kg/t, não apresentou grande correlação entre a geração de resíduos versus taxa de injeção de carvão nas ventaneiras do Alto-forno A.

Por fim, outros estudos publicados na comunidade científica atestam que a perda de eficiência de combustão do carvão injetado nas ventaneiras de altos-fornos em função da taxa de injeção sofre maior elevação a partir de valores acima de 190 kg/t, valores que não são praticados em Monlevade.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Uma vez que os resultados encontrados são condizentes com publicações técnicas e considerando que os dias das coletas ocorreram com grande estabilidade operacional do Alto-Forno A, conclui-se que a técnica é eficaz para a diferenciação dos diferentes tipos de carbono. Adicionalmente o centro de pesquisa da ArcelorMittal Brasil possui *Knowhow* e os equipamentos necessários para a execução dos ensaios, evitando-se contratações externas que poderiam tornar as análises demoradas e caras. Posto isso, o método proposto torna-se estrategicamente importante para o grupo, principalmente projetando a possível utilização de novos combustíveis no futuro, com o intuito de redução de emissão de CO₂.

8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a dificuldade encontrada na coleta das amostras devido entupimentos parciais ou totais do sistema de amostragem composto por lança, ciclone e mangueira para descarte de gás para a atmosfera, sugere-se projetar a lança com furos de maior diâmetro, evitando-se assim possíveis entupimentos durante a amostragem e permitindo a coleta mesmo em situações de temperatura de topo mais baixa. O diâmetro dos furos da lança utilizados para o estudo em questão foram de 9mm.

Sugere-se também complementar o estudo com medições da concentração de pó no gás de topo no momento da coleta das amostras. Tal informação, pode ser usada para transformar os percentuais em massa de cada carbono em kg/t de gusa, evitando-se utilizar para tal transformação, dados da geração de pó e lama do sistema de limpeza de gases, que podem sofrer ruídos caso a gestão operacional desses dados não sejam confiáveis.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-OMARI, Y. Influence of coal ash and process conditions on coal/char reactivity for PCI into BF. Sydney: The University of New South Wales, 2004, 139p. (Thesis, (Master of Engineering)).

ASSIS, P.S., Injeção de Materiais Pulverizados em Altos Fornos, curso ABM – associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004.

BABICH, A.; YAROSHEVSKII, S.; FORMOSO, A.; ISIDRO, A.; FERREIRA, S.; CORES, A.; GARCIA, L.; Increase of pulverized coal use efficiency in blast furnace. ISIJ International, v. 36, n. 10, p. 1250–1258, 1996.

CARPENTER, A. M. Use of PCI in blast furnaces. CCC/116, London, UK, IEA Clean Coal Centre. Sep 2006, 66p.

CASTRO, L. F. A., CARNEIRO, R. T. S.; ULHÔA, M. B.; TAVARES, R. P. Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno. Contrato de Cooperação Técnica entre Usiminas e Fundação Cristiano Ottoni, Belo Horizonte, Outubro, 1997.

DENARI, G.B.; CAVALHEIRO, E.T.G.; Princípios e aplicações de análises térmicas. Material de apoio para curso teórico/prático. Universidade de São Paulo, São Carlos, Julho, 2012.

FERNANDES, M. V. Efeito do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno no consumo de combustíveis (fuel rate). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007, 56p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C.V.D; Modern Blast Furnace Ironmaking; An Introduction. 2.ed. Amsterdã: IOS Press BV, 2009. 176p.

HUTNY, W.P.; LEE, G.K.; PRICE, J.T., Fundamental of Coal Combustion During Injection into a Blast Furnace, Progress in Energy and Combustion Science, Ottawa, v.17, p373s-395s, 1991.

KHAIRIL, D.; KATSUYA, N.; NARUSE, I. Fundamental reaction characteristics of pulverized coal at high temperature. ISIJ International, v. 41, n. 2, p.136-141, 2001.

LU, L.; SAHAJWALLA, V.; HARRIS, D.; Coal Char Reactivity and Structural Evolution during Combustion – Factors Influencing Blast Furnace Pulverized Coal Injection Operation. Metallurgical and Materials Transactions B. v. 32B, p. 811-820, 2001.

MACHADO, A.S.; MEXIAS, A.S.; VILELA, A.C.F.; OSORIO, E., Study of coal, char and coke fines structures and their proportions in the off-gas blast furnace samples by X-ray diffraction, Elsevier, Porto Alegre, V. 114, p. 224-228, 2012.

NARUSE, I., INADA, T. In: ISHII, K. Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. 1. ed. Oxford, UK: Pergamon – Elsevier Science, 2000. Cap. 2, p. 15-35.

NG, K.W.; GIROUX, L.; MACPHEE, T.; TODOSCHUK, T.; TAGGART, L.; SCOTT, G., Carbon type differentiation technique for diagnosing pulverised coal injection efficiency. Ironmaking and Steelmaking, v. 43, n. 3, p. 214-219, 2016.

NG, K.W.; HUANG, X.; GIROUX, L.; TODOSCHUK, T., Carbonaceous Materials Transformation in Pulverized Coal Injection. AISTech 2019, Pittsburgh, p. 427-434, 2019.

RECH, R. L. Desenvolvimento de equipamento para estudos de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos siderúrgicos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018, 122p. (Dissertação, Doutorado em Engenharia Química).

SILVA, A. M. Estudo da combustão de carvões e misturas com coque verde de petróleo injetadas em altos-fornos. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, 2006, 76p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

WU, K.; CHEN, H.; XU, W.; HE, H.; ZHOU, X.; FEI, S.; Ratio between Unconsumed Coal and Coke Particle in the BF Dust. *Steel Research Int.* n. 12, p. 899 – 903, 2008.

YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; MATSUNAGA, S.; KAKIUCHI, K.; AMANO, S.; Test on High-rate Pulverized Coal Injection Operation at Kimitsu No. 3 Blast Furnace. *ISIJ International*, v. 35, n. 2, p. 148-155, 1995.

YU, J.; SUN, L.; XIANG, J.; HU, S.; SU, S.; WANG, Y. New Method of Quantitative Determination of the Carbon Source in Blast Furnace Flue Dust. *American Chemical Society*, V. 28, p. 7235–7242, 2014.