

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

TESE DE DOUTORADO

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ESTUDOS DE INJEÇÃO
DE CARVÃO PULVERIZADO EM ALTOS-FORNOS SIDERÚRGICOS

René Lucio Rech
Engenheiro Químico, MSc em Engenharia Química

PORTO ALEGRE

2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

TESE DE DOUTORADO

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ESTUDOS DE INJEÇÃO DE
CARVÃO PULVERIZADO EM ALTOS-FORNOS SIDERÚRGICOS

René Lucio Rech

Engenheiro Químico, MSc em Engenharia Química

Trabalho realizado no Laboratório de Siderurgia do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento de Processos

Orientador

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio

Banca Examinadora do PPGEQ

Prof. Dr. Marcelo Godinho

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Dr. Mario Saffer

Coordenadora do PPGEQ

Prof. Dr. Isabel Cristina Tessaro

Dedico este trabalho à Ruth, esposa amada e parceira fiel desde nossa juventude e aos grandes presentes que Deus me ofereceu e que me estimulam a dar sempre o melhor de mim: aos filhos queridos e dedicados Rosane, Rafael e Raquel e aos netos muito especiais Antônio, Bianca, Júlia e Lucas (que já está chegando!).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pai amoroso, pelos dons da vida e da fé e pelas graças com que tem me cumulado durante toda a minha vida.

A minha esposa Ruth, que, desde que nos conhecemos há mais de meio século, com seu amor e dedicação, sempre me estimulou a enfrentar novos desafios.

Aos meus filhos Rosane, Rafael e Raquel, que sempre me ofereceram seu apoio, seu carinho e seu auxílio.

Aos meus netos muito amados Antônio, Bianca, Júlia e Lucas, que já está chegando, fontes de alegria e de energia que me fazem rejuvenescer a cada dia.

Aos meus pais, Lucio (*in memoriam*), exemplo de honestidade e solidariedade, e Iris, já quase centenária e cheia de vida, exemplo de busca incessante de conhecimento, que sempre acreditaram em mim e tudo fizeram, com seu exemplo e trabalho, para que eu buscasse ser uma pessoa do bem.

Aos irmãos Adalberto e Olga, que continuam até hoje a dar-me seu apoio fraternal, à nora Mariana e aos genros Leonardo e Bruno, novos filhos queridos com que meus filhos me presentearam.

Aos casais amigos que há tantas décadas comigo oram, laboram e comemoram e que são exemplo de amizade fraterna e a todos os amigos e ex-colegas da UFRGS, aos sobrinhos, cunhados e cunhadas, que não me negaram seu incentivo.

Ao Professor Nilson, que me aceitou como seu orientando, ciente de que isto seria um desafio, que sempre me apoiou e me estimulou a não desistir.

Aos professores Vilela e Osório, que me acolheram no LASID e me permitiram fazer parte deste projeto tão desafiador.

Aos colegas de doutorado e de projeto André e Claudia, que foram importantes e indispensáveis com seu apoio e coleguismo, para o sucesso desta empreitada.

Aos professores, pesquisadores e funcionários do PPGEQ, do PPGE3M e do PROMEC, pelo seu apoio e estímulo que nunca me faltaram.

A todos os colegas doutorandos, mestrandos e bolsistas, cujos nomes não citarei para não cometer omissão involuntária, que me aceitaram como um irmão mais velho, já algo arcaico, e que me deram todo seu apoio.

Ao CNPq/Rede Carvão, à CAPES, ao CNPq e à FAPERGS pelo suporte financeiro ao projeto e a Vale S.A. pelo financiamento à infraestrutura para a instalação do simulador.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	O Processo de Injeção de Carvões Pulverizados em Altos-Fornos ...	9
3.1.1	O Alto-Forno Siderúrgico	9
3.1.2	O Processo PCI.....	12
3.2	A Combustão do Carvão Mineral	17
3.2.1	O Carvão Mineral	17
3.2.2	Fenômenos da Combustão de Carvão	18
3.2.3	Combustão do Carvão no Processo PCI	19
3.2.4	Propriedades de carvões para PCI	23
3.3	Avaliação da Combustibilidade de Carvões para Injeção	26
3.3.1	Técnicas de Avaliação da Combustibilidade.....	26
3.3.2	Simuladores da Zona de Combustão do Alto-Forno	28
3.4	Carvão brasileiro	36
4	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR DE PCI	40
4.1	Etapas de Desenvolvimento do Projeto	40
4.1.1	Etapas Executadas	40
4.1.2	Etapas em Andamento.....	41
4.1.3	Etapas Futuras Previstas	42
4.2	Projeto Conceitual	42
4.2.1	Bases do Projeto.....	42
4.2.2	Descrição do Projeto.....	44
4.3	Projeto Construtivo.....	46

	4.3.1	Materiais.....	46
	4.3.2	Equipamentos.....	47
	4.3.3	Instrumentação e Controle	60
5		PRÉ-OPERAÇÃO DO SIMULADOR DE PCI.....	65
	5.1	Procedimentos Operacionais.....	65
	5.2	Testes Pré-Operacionais	68
	5.2.1	Preparação das Amostras de Combustível Sólido.	68
	5.2.2	Testes Preliminares.....	71
	5.2.3	Testes de Combustão.....	72
	5.3	Resultados e Discussão dos Testes Pré-Operacionais	75
	5.3.1	Eficiência de arraste	75
	5.3.2	Resultados dos testes de combustão	80
	5.4	Propostas para Melhoria do Desempenho.....	98
	5.4.1	Propostas para a Zona de Alta Pressão	99
	5.4.2	Propostas para a Zona de Alimentação do Carvão	99
	5.4.3	Propostas para a Zona de Pré-Aquecimento e Mistura.....	100
	5.4.4	Propostas para a Zona de Combustão e Coleta de Char.....	101
	5.4.5	Propostas para a Zona de Coleta dos Gases de Combustão....	102
	5.5	Propostas de Testes Experimentais	103
6		CONCLUSÕES.....	106
7		REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um alto-forno siderúrgico.....	12
Figura 2: Reações Químicas na “Raceway”.....	15
Figura 3: Etapas da combustão de carvão empregado para PCI.....	22
Figura 4: Diagrama Esquemático do Simulador de PCI do Instituto de Siderurgia da Universidade de Aachen - IEHK/RWTH, Alemanha.....	43
Figura 5. Fluxograma de Processo do Simulador de PCI do LASID/UFRGS.....	46
Figura 6. Simulador de combustão do LASID/UFRGS. Visão geral e principal módulos: 1 – forno de pré-aquecimento, 2 – forno de combustão, 3 – sistema de alimentação, 4 – pulso, 5 – painel de gases, 6 – central de controle e medição, 7 – filtro coletor de char, 8 – cilindro coletor de gases, 9 – sistema de vácuo e refrigeração.....	48
Figura 7. Fluxograma da zona de alta pressão - ZAP.....	49
Figura 8. Fluxograma da zona de alimentação do carvão - ZAC.....	50
Figura 9: Fluxograma da zona de pré-aquecimento e mistura - ZPM.....	52
Figura 10: Fluxograma da zona de combustão e coleta do char – ZCC.....	55
Figura 11: Fluxograma da zona de coleta dos gases de combustão - ZCG.....	58
Figura 12: Vista geral da sala do simulador do LASID.....	63
Figura 13: Gráfico de aquisição rápida da evolução de pressão e temperatura num tiro em vazio.....	67
Figura 14: Perfil de pressões durante um pulso em vazio para Δp de tiro de 4/2 bar.	77
Figura 15: Eficiência de arraste a frio para Δp de 5/3 bar.	79
Figura 16: Ensaios de combustão com 100% O ₂ a 3 bar. Gráfico superior: em vazio; gráfico inferior: com 2 g carvão AV2.	82
Figura 17: Comparação da evolução das pressões e temperatura para diferentes massas de combustível na combustão de carvão AV2 com oxigênio.	89
Figura 18: Variação da temperatura máxima (A) e pressão máxima (B) de combustão com a massa de carvão injetada e pressão de O ₂	90
Figura 19: Variação da relação CO/CO ₂ (C) e do <i>burnout</i> (D) com a massa de carvão injetada e da pressão de O ₂	92

Figura 20: Gráfico do <i>burnout</i> em função do teor de matéria volátil para dois conjuntos distintos de pressão.	95
Figura 21: Imagens do combustor de carvão (a) antes da combustão e (b) durante a combustão.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Rotinas do Simulador de PCI do LASID/UFRGS.....	66
Tabela 2: Características dos combustíveis selecionados.....	69
Tabela 3: Distribuição da massa de amostra nos ensaios de arraste	79

RESUMO

A injeção de carvão pulverizado (*pulverized coal injection* - PCI) é uma técnica largamente utilizada nos altos-fornos pelas siderúrgicas brasileiras, seguindo uma tendência mundial, que busca reduzir o consumo específico de coque por tonelada de gusa e, em consequência, do custo do ferro gusa produzido. A combustão do carvão pulverizado ocorre sob pressões médias (de até 4 atm), temperaturas de chama elevadas (em torno de 2 000 °C), altas taxas de aquecimento (10^4 a 10^5 °C/s), tempo de residência muito curtos (inferiores a 40 ms), e é seguida pela gaseificação na presença de CO₂. Como não existem métodos padronizados para a avaliação das características de combustão dos carvões para sua utilização em PCI, utilizam-se geralmente equipamentos de injeção de carvão em escalas laboratorial e de bancada, além plantas-piloto com este propósito.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar as etapas do desenvolvimento de um equipamento em escala de bancada realizado no Laboratório de Siderurgia da Escola de Engenharia da UFRGS (LASID-UFRGS), desde o projeto conceitual até a fase pré-operacional, e os resultados iniciais obtidos, para estudar as características de combustão dos carvões em condições bastante similares às que ocorrem nos altos-fornos. Os testes iniciais incluem a avaliação da combustão de um carvão brasileiro objetivando seu uso potencial em PCI, em substituição parcial de carvões importados para este fim.

Optou-se por um projeto moderno, altamente automatizado, que inclui aquisição rápida de dados, com escala e conceito operacional adequados para estudos acadêmicos, de configuração vertical e que possibilitasse a operação no modo de injeção de uma amostra de carvão em pulso único, bem como uma adequação futura ao modo de injeção contínua de carvão. Algumas características relevantes do equipamento são a medição e aquisição ultrarrápida de dados termodinâmicos de pressão e temperatura em diversos pontos do sistema, permitindo o registro dos fenômenos transientes que ocorrem durante a combustão, a possibilidade de programação e controle de tempos, pressões e temperaturas para testes de combustão e de pirólise através de rotinas especialmente desenvolvidas para isto, bem como a coleta representativa dos produtos sólidos e gasosos resultantes da combustão para posterior análise. É ainda possível a filmagem da

combustão em modo ultrarrápido, permitindo correlacionar as imagens aos dados termodinâmicos registrados durante a combustão ao longo de um segundo, em intervalos de poucos milissegundos.

Os resultados iniciais obtidos na fase pré-operacional demonstram o bom funcionamento do sistema, permitindo distinguir claramente a influência da variação de parâmetros operacionais como tipo de carvão, massa e de amostra injetada, pressão e temperatura de operação e composição dos gases oxidantes.

Palavras-chave: Carvão pulverizado; Combustíveis; Alto-forno; Zona de combustão.

ABSTRACT

Pulverized coal injection (PCI) is a technique used in blast furnaces (BFs) by Brazilian steel industry, following a worldwide trend, to reduce coke consumption by ton of hot metal produced, and therefore reducing the overall cost. Burning of pulverized coal injected into tuyeres of BFs takes place under medium pressure (up to 4 atm), high flame temperatures (around 2 000 °C), very fast heating rates (10^4 – 10^5 °C/s) and very short residence times, less than 40 ms, followed by gasification in presence of CO₂. Since there are no standard tests for evaluation of coal combustibility at PCI conditions, lab and bench scale coal injection rigs and pilot plants are usually employed for this purpose.

This work shows the development steps of a bench-scale rig, built at the Iron and Steelmaking Laboratory of the School of Engineering - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LASID-UFRGS), from the conceptual design to the pre-operational step, as well as the initial results. This equipment permits to study the combustion characteristics of coals in conditions very close to those occurring in blast furnaces. Initial tests include the combustion evaluation of a Brazilian coal, aiming its potential usage for PCI, in partial substitution of imported coals for this purpose.

The rig has a modern design and is highly automated. Its scale and operational concept is fitted for academic studies. It has a vertical configuration, to be operated with injection of a coal sample in a single pulse mode and is capable to be adjusted afterwards to continuous coal injection mode. Some relevant characteristics of the injection rig are: (1) the very fast measurement and acquisition of thermodynamic data of pressure and temperature in several points of the system, allowing the capture of transient phenomena occurring along the combustion process; (2) the possibility of programming and controlling time intervals, pressures and temperatures to perform combustion and pyrolysis tests, employing specially developed routines; and (3) the representative sample collection of solid and gaseous combustion products to be further analyzed. It is also possible to capture images of the combustion by a high-speed camera, allowing correlate the images, acquired during a time interval of one second, with the thermodynamic data collected in intervals of few milliseconds.

The good performance of the equipment was shown by the initial results obtained at the pre-operational phase. The experimental data clearly depicted the effect of operational parameters like coal type, injected sample mass, operational pressure and temperature, and oxidizing gas composition.

Keywords: Pulverized coal injection; Coal combustion; Injection rig; Blast furnace raceway.

.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de combustão de carvão mineral pulverizado remonta ao início do século XX. As taxas elevadas de geração de calor pela queima muito mais rápida do que nos sistemas tradicionais de grelhas, permitiu a construção de caldeiras e fornalhas de grande porte, com maior potência térmica e maior flexibilidade operacional. Estes equipamentos foram estratégicos para a implantação de grandes termelétricas e plantas carboquímicas na primeira metade do século XX.

A indústria siderúrgica ao longo dos séculos utilizou a madeira e o carvão vegetal como fontes de energia térmica e de agentes redutores dos minérios de ferro para a produção do ferro metálico. O grande aumento da necessidade de aço a partir da Revolução Industrial levou ao desenvolvimento de altos-fornos siderúrgicos baseados no uso de coque mineral, com maior resistência mecânica do que os carvões vegetais, como fonte de energia e de agentes redutores. Carvões minerais adequados para a produção de coques de alta qualidade, compatíveis com o aumento continuado de capacidade e dimensões dos novos altos-fornos siderúrgicos, passaram a ser altamente valorizados no mercado internacional, com preços muito superiores aos dos carvões para geração térmica.

Desde a segunda metade do século XX, a indústria siderúrgica mundial vem desenvolvendo e adotando processos de injeção de combustíveis auxiliares nas ventaneiras dos altos-fornos, como uma das formas de redução do custo de produção do ferro gusa. O aumento dos preços dos derivados de petróleo a partir da década de 70 estimulou a adoção de processos de injeção direta de carvões pulverizados, de custos energéticos menores do que os dos coques. Atualmente, o processo PCI (*Pulverized Coal Injection*) está sendo adotado em toda a siderurgia mundial, inclusive nos altos-fornos brasileiros, permitindo redução significativa do consumo específico de coque por tonelada de gusa, com a consequente redução do custo de produção.

Além do objetivo principal, que é a redução de custo pela substituição parcial do coque por carvões de menor preço, em especial, carvões não apropriados para a produção de coque por não apresentarem características aglutinantes adequadas, o processo PCI apresenta outras características econômicas, técnicas e ambientais favoráveis (CARPENTER, 2006). Entre elas, ressalta-se sua flexibilidade quanto aos

carvões minerais utilizáveis, desde linhitos até semi-antracitos, geralmente sob forma de mesclas de carvões, otimizadas quanto às suas propriedades. Estas mesclas podem ainda incluir carvões vegetais e derivados de petróleo. Todavia, os carvões para PCI ou suas mesclas devem apresentar baixos teores de cinzas, enxofre e álcalis, similares aos dos carvões para produção de coque (OSÓRIO, VILELA e SAMPAIO, 2008).

A adoção de mesclas para PCI pela indústria siderúrgica mundial, inclusive nas usinas brasileiras, permite não apenas a otimização tecnológica através da escolha das melhores características para PCI para cada alto-forno específico, mas também a otimização de custos do respectivo processo PCI. A ampla variedade de oferta de carvões para PCI no mercado mundial, com diferentes características químicas e energéticas e com preços relativos flutuantes pela relação oferta/demanda, permite que as indústrias adotem políticas de minimização do custo através da adequação permanente das misturas injetadas, aproveitando vantagens logísticas e de preço, através da diversificação de fornecedores. No caso da siderurgia nacional, a totalidade dos carvões minerais consumidos tanto para a produção de coque como para PCI é importada, com ônus significativo para a balança comercial brasileira. Como benefício adicional, a injeção de misturas facilita igualmente a adequação do processo quanto ao atendimento dos limites de emissões estabelecidos pela legislação ambiental.

O Brasil possui grandes reservas de carvões minerais localizadas na Região Sul, em especial no Rio Grande do Sul. A produção atual é destinada ao uso exclusivo para produção de energia térmica em termoelétricas e em algumas caldeiras industriais de grande porte. A mineração a céu aberto permite custos de produção competitivos, quando comparados a outros combustíveis disponíveis, de origem fóssil ou renovável, seja quando utilizados com elevados teores de cinzas, em torno de 50 %, característicos de “boca de mina”, ou beneficiados para 30 a 40 % de cinzas, para atendimento de características técnicas e restrições ambientais próprias de alguns usuários atuais.

Quanto ao uso em siderurgia, os carvões brasileiros são predominantemente não-coqueificáveis e se caracterizam por apresentarem altos teores de cinzas e enxofre. Mesmo assim, alguns estudos publicados têm avaliado seu potencial

tecnológico como componentes de misturas para injeção em altos-fornos (GOMES *et al.*, 2003; OSÓRIO *et al.*, 2004 e 2006; KALKREUTH *et al.*, 2005; GHIGGI *et al.*, 2006; GOMES *et al.*, 2006; MACHADO, *et al.*, 2008; MACHADO, 2009; MACHADO *et al.*, 2010).

Entre os outros combustíveis brasileiros suscetíveis de injeção em altos-fornos na forma de misturas com carvões importados, destacam-se o carvão vegetal e o coque de petróleo, também na forma pulverizada. O carvão vegetal apresenta baixos teores de cinzas e alta combustibilidade e, por ser de origem renovável, contribui para a redução das emissões de CO₂ dos altos-fornos, uma importante meta atual da indústria siderúrgica mundial. Por ter condições favoráveis para a produção de biomassa energética, o Brasil ostenta hoje a posição de maior produtor mundial de ferro gusa em pequenos altos-fornos a carvão vegetal. Já o coque de petróleo é praticamente isento de cinzas, o que favorece o seu uso em misturas com carvões brasileiros com teores elevados de cinzas.

Os altos-fornos siderúrgicos são equipamentos industriais de grande porte, com elevada capacidade, com um complexo sistema de reações químicas simultâneas, homogêneas e heterogêneas, exotérmicas e endotérmicas. Os fluxos de sólidos, de gases e de minerais e metais fundidos, com transferência de calor, massa e quantidade de movimento entre essas correntes, ocorrem em equilíbrio estável durante a operação. A realização de testes industriais de injeção de combustíveis auxiliares que afetem este equilíbrio exige aprofundados estudos prévios, sob risco de grave colapso operacional e grande impacto econômico. As condições severas de temperatura, pressão e movimentação de materiais reinantes dificultam sobremaneira a realização de observações e medições diretas em seu interior.

Diferentes técnicas em escala laboratorial e piloto são utilizadas para avaliar o comportamento dos combustíveis auxiliares injetados, em especial, do carvão pulverizado. As mais utilizadas são os testes experimentais em altos-fornos pilotos ou de pequeno porte, os ensaios em simuladores da zona de combustão dos altos-fornos e em fornos de queda livre para avaliação da combustibilidade de sólidos e das características dos produtos gasosos e sólidos resultantes e, por fim, as análises termogravimétricas realizadas em termobalanças para determinar as taxas

cinéticas das reações químicas heterogêneas envolvidas na combustão, bem como a reatividade dos combustíveis sólidos.

Os testes em plantas-piloto ou altos-fornos de pequeno porte fornecem, além de dados específicos referentes ao processo de combustão, informações sobre a influência do PCI no processo operacional de um alto-forno e permitem ajustar simultaneamente as condições do processo PCI e as condições de operação do equipamento piloto para otimizar seu desempenho. São testes que envolvem altos custos operacionais, costumam ter duração prologada por vários turnos sucessivos e necessitam geralmente de equipes técnicas treinadas. A instalação e operação desse tipo de plantas é mais compatível com os recursos disponíveis em setores de pesquisa e desenvolvimento das empresas e em instituições de desenvolvimento de tecnologias industriais.

Os simuladores da zona de combustão buscam simular em escala laboratorial ou de bancada a combustão de carvão pulverizado em condições muito próximas às que ocorrem na zona de combustão do alto-forno, em especial, quanto às temperaturas, pressões, granulometria dos carvões, relação oxigênio – carbono, altas taxas de aquecimento e tempos muito curtos de permanência do carvão na zona de combustão. Por isso, quando comparados aos fornos de queda livre que tem taxas de aquecimento menores e maiores tempos de reação, os simuladores têm se mostrado como os mais adequados para a avaliação da combustibilidade de carvões minerais pulverizados e de misturas de combustíveis sólidos, pois fornecem dados de processo mais representativos quanto ao seu comportamento real nas condições do processo PCI.

Para atingir altas taxas volumétricas de geração de energia na zona de combustão do alto-forno, utilizam-se taxas elevadas de injeção de carvão pulverizado pelas ventaneiras, com sopros de alta velocidade de ar enriquecido com oxigênio, o que reduz o tempo de combustão do carvão a alguns centésimos de segundo. A eficiência de combustão tipicamente cai com o aumento da taxa de injeção (CARPENTER, 2006). Logo, os carvões a serem injetados devem apresentar alta combustibilidade, isto é, alta eficiência de combustão, minimizando a quantidade de carbono no resíduo sólido pós-combustão (char). Quanto maior a taxa de injeção de carvão, maior a combustibilidade desejada para evitar possíveis problemas

causados pelo char, especialmente a redução de permeabilidade devida ao char arrastado pelo fluxo ascendente dos gases através da cuba do alto-forno.

Por isso, os testes de avaliação de combustibilidade em escala laboratorial ou em plantas piloto em universidades, institutos de pesquisa e indústrias são decididamente importantes na escolha dos carvões para uso em processos de PCI, já que não existem métodos padronizados para essa avaliação. Além do estudo comparativo de comportamento de carvões durante a combustão para embasar a seleção dos mais adequados a cada processo específico, eles fornecem dados essenciais para o estudo qualitativo e quantitativo dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante, de grande valia para a modelagem dos processos, ferramentas essenciais para o projeto e otimização operacional dos mesmos.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho de tese proposto é o projeto e a construção de um equipamento em escala laboratorial para realizar estudos e testes de combustibilidade de carvões pulverizados em condições próximas às que ocorrem na zona de combustão dos altos-fornos siderúrgicos.

Além da operação em condições próximas às do alto-forno, o projeto contemplou outros objetivos específicos:

- Adequação à realização de estudos acadêmicos que permitem a variação de parâmetros operacionais como natureza e granulometria dos carvões, temperatura de pré-aquecimento do ar e de combustão, pressão de operação, massa de combustível injetado, volume e composição da mistura oxidante e tempo de residência dos sólidos na zona de combustão.

- Capacidade de medição e registro das variações de temperatura e pressão ao longo do tempo de combustão, da ordem de centésimos de segundo.

- Possibilidade de coleta representativa dos produtos gasosos e sólidos da combustão.

- Controle automatizado e flexível, com programação dos diversos parâmetros de operação, e com rotinas operacionais para diferentes tipos de ensaios.

- Simplicidade operacional, capaz de ser operado por alunos de graduação e pós-graduação.

- Escala laboratorial e custos operacionais compatíveis com disponibilidade limitada de recursos, própria de projetos de pesquisa acadêmica.

- Concepção para operação inicial em regime descontínuo, com injeção discreta e instantânea do combustível a ser estudado, porém com a possibilidade de conversão futura para operação em regime contínuo, tanto para injeção de combustíveis gasosos como de combustíveis sólidos pulverizados.

Como objetivos secundários, temos ainda:

- Realizar estudos de combustibilidade para desenvolver um método de ensaio padrão de combustibilidade de carvões minerais no simulador de PCI do LASID-UFRGS, que forneça resultados precisos e repetíveis, adequado para utilização em estudos comparativos de desempenho no processo PCI de combustíveis sólidos e de suas misturas, tanto para pesquisas acadêmicas como

para pesquisas aplicadas de suporte tecnológico às indústrias siderúrgicas brasileiras.

- Contribuir para a realização de ensaios variando os parâmetros operacionais que forneçam resultados experimentais para subsidiar a modelagem da cinética e termodinâmica predominantes nas condições de combustão nos processos de injeção de carvão pulverizado.

- Contribuir para a realização de ensaios de combustibilidade com carvões brasileiros e importados, isoladamente e em misturas, para subsidiar estudos de viabilização técnica do seu uso para injeção em altos-fornos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PROCESSO DE INJEÇÃO DE CARVÕES PULVERIZADOS EM ALTOS-FORNOS

3.1.1 O Alto-Forno Siderúrgico

A utilização de altos-fornos para a redução de minérios de ferro até ferro metálico já vem sendo adotada desde o início da Revolução Industrial para suprir as necessidades crescentes de consumo de aço. Nele, os óxidos de ferro dos minérios são reduzidos a ferro metálico por ação de carbono sob a forma de carvão vegetal ou de coque produzido a partir de carvões minerais adequados ao processo de coqueificação.

Um alto-forno siderúrgico pode ser classificado como um reator químico heterogêneo de leito móvel em operação contínua em alta temperatura (HUTNY, LEE e PRICE, 1991). Os sólidos reagentes (minério de ferro, material fundente e coque ou carvão vegetal) são carregados sucessiva e alternadamente pelo topo, distribuídos em camadas homogêneas ao longo da seção do forno. Os óxidos de ferro são reduzidos a ferro metálico pelos gases quentes ascendentes e as impurezas do minério (ganga) e do coque são incorporadas ao material fundente. Os produtos sólidos fundidos pela alta temperatura da zona de combustão, ferro gusa e escória, decantam em duas fases líquidas de densidades diferentes na região do cadinho do alto-forno e são escoados em vazadouros próprios. O coque tem importância fundamental pois é o único produto que chega no estado sólido até o nível das ventaneiras. Assim, além de ser fonte de carbono para a geração de calor na combustão e para a redução dos óxidos de ferro, deve suprir suporte mecânico de sustentação do leito e garantir a permeabilidade do leito para a ascensão dos gases.

Ar enriquecido ou não com oxigênio é insuflado sob pressão e temperatura elevada na zona de combustão do coque através de ventaneiras laterais na seção inferior do forno, logo acima do cadinho. Os gases resultantes da combustão são removidos como “gás de topo”, arrastando consigo sólidos particulados. O ar insuflado promove uma combustão intensiva dos materiais carbonosos presentes, coque e combustíveis auxiliares injetados em processos PCI, gerando temperaturas

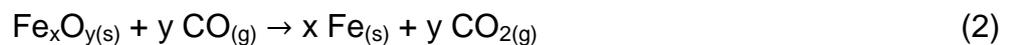
de chama acima de 2.000 °C, necessárias à fusão do ferro metálico e da escória, e fornecendo a energia necessária para as reações sucessivas de redução dos óxidos de ferro e regeneração dos agentes redutores gasosos, bem como para o aquecimento dos sólidos alimentados pelo topo. Para obterem-se temperaturas elevadas de chama e para vencer as perdas de carga inerentes ao deslocamento dos gases ascendentes até o topo do leito e aos sistemas de remoção de pó dos gases em alta temperatura, o ar é injetado com pressão de 2 a 4 bar, temperatura de 900 – 1200 °C e velocidade de 150 – 250 m/s. Atualmente, adota-se ainda o enriquecimento do ar a 25 – 28% de oxigênio.

O alto-forno siderúrgico apresenta zonas fixas sucessivas de contato entre os reagentes gasosos e sólidos ao longo de sua altura, onde ocorrem reações químicas típicas de cada zona e complexas condições de transferência de calor, massa e quantidade de movimento. Para simplicidade de análise, pode-se agrupá-las em duas zonas principais.

Na zona inferior de oxidação, responsável pela geração de energia para o processo, ocorre a combustão do carbono presente (**Equação 1**), com intensa produção de calor, conforme a reação fortemente exotérmica:



Na zona superior de redução, ocorrem as diversas reações sucessivas de redução dos óxidos de ferro até ferro metálico (**Equação 2**), que podem ser agrupadas na reação genérica global:



A geração do CO necessário para a redução dos óxidos de ferro também ocorre nesta região, através da reação endotérmica do CO₂ produzido na combustão com o carbono do coque (**Equação 3**), conhecida como reação de Boudouard:



As reações (1) e (2) podem ser somadas (**Equação 4**) para se obter a geração líquida de energia térmica a partir do carbono do coque e do combustível do PCI:



A reação de redução, consumindo CO e gerando CO₂, e a reação de Boudouard, consumindo CO₂ e gerando CO, ocorrem simultânea e sucessivamente ao longo da zona superior, com taxas significativas acima de 800 °C. Antes de sua exaustão pelo topo da carga, os gases ascendentes secam e aquecem os sólidos descendentes. O calor sensível do fluxo gasoso quente vindo da zona inferior do alto-forno é responsável pelo fornecimento de toda a energia necessária para promover as reações endotérmicas e para o aquecimento dos sólidos até as temperaturas de reação.

Na Figura 1, vemos um corte esquemático simplificado de um alto-forno siderúrgico típico, com as zonas de entrada de reagentes e saída de produtos.

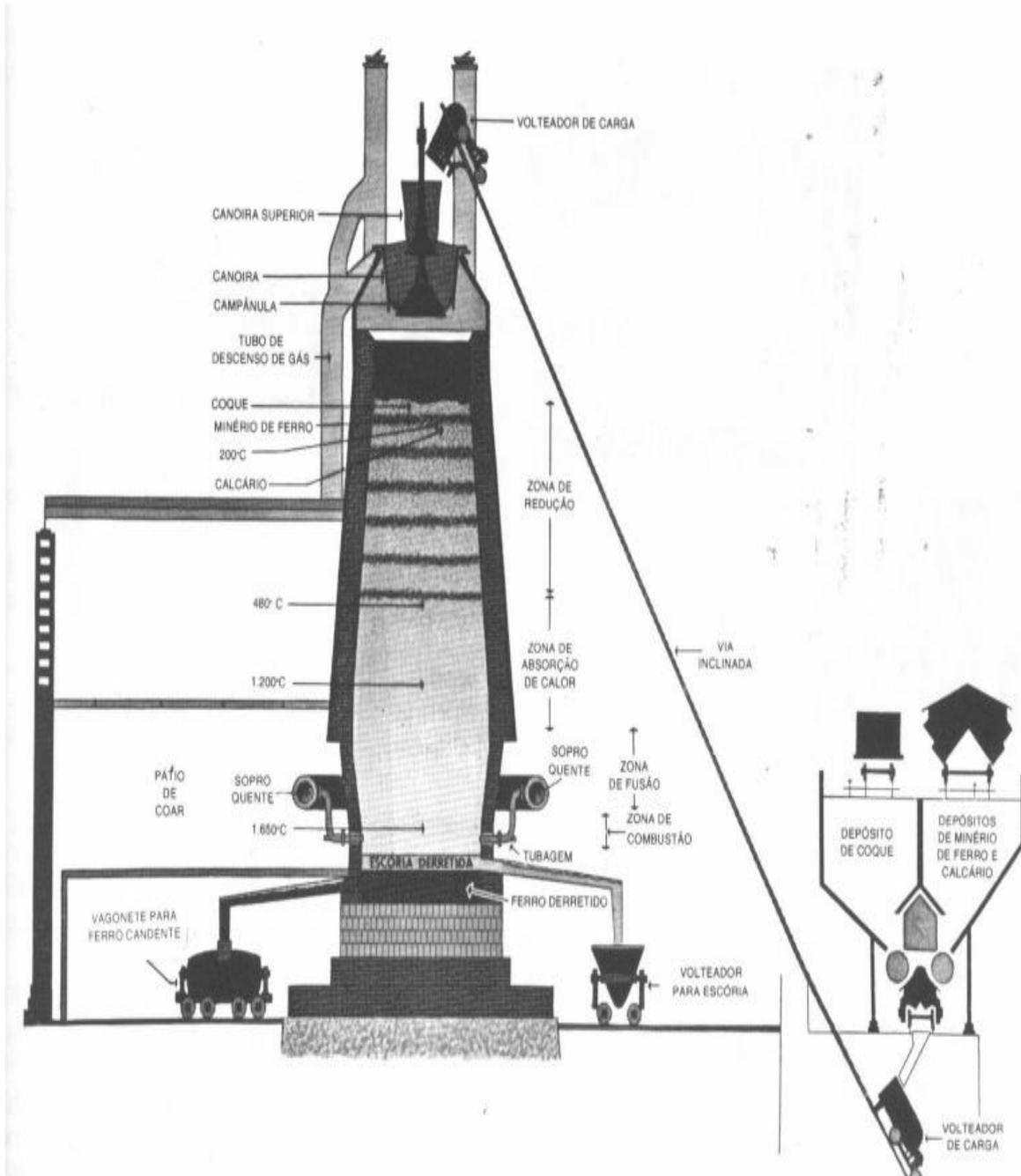


Figura 1: Esquema de um alto-forno siderúrgico.

3.1.2 O Processo PCI

O aumento de escala dos altos-fornos desde a segunda metade do século XIX, em especial, da sua altura, resultou em maiores exigências de qualidade dos coques utilizados, em especial, no que se refere à resistência mecânica elevada

associada à alta porosidade. Com a demanda crescente de carvões coqueificáveis de alta qualidade e com o aumento dos seus preços, a indústria siderúrgica intensificou esforços para a redução do *coke rate*, isto é, do consumo de coque por tonelada de ferro gusa produzido.

A partir da segunda metade do século XX, o processo PCI de injeção de combustíveis auxiliares nas ventaneiras passou a ser utilizado para reduzir o *coke rate* como forma efetiva de redução do custo de produção do ferro gusa (CARPENTER, 2006). Com o aumento do preço do petróleo e de seus derivados na década de 70, o carvão mineral pulverizado passou a ser o principal combustível auxiliar injetado nos altos-fornos. Ao longo das últimas décadas, tem-se buscado taxas crescentes de injeção, resultando também em maiores exigências também para a qualidade dos carvões injetados isoladamente ou sob a forma de misturas.

A causa principal da adoção do PCI, que atualmente atinge em algumas usinas níveis de substituição de até 50 % do coque, é a redução de custos resultante dos preços significativamente menores dos carvões não-coqueificáveis de qualidade energética e composição química similares aos coqueificáveis. Além disso, outros benefícios operacionais e econômicos podem ser salientados (CARPENTER, 2006, HUTNY *et al.*, 1996; DENO e OKUNO, 2000).

- Consumo menor de coque e, em consequência, menor consumo de carvões coqueificáveis e aumento da vida útil das coquearias.
- Aumento da produtividade dos altos-fornos.
- Maior flexibilidade operacional do alto-forno, pois o PCI permite ajustar a taxa de injeção e a temperatura de chama e alterar, assim, mais rapidamente a condição térmica do forno do que se consegue através da alteração da distribuição de carga de minério e coque no topo do alto-forno.
- Aumento na constância de qualidade do ferro gusa e do seu teor de silício.
- Redução global nas emissões gasosas da usina, em especial, das emissões da coqueria integrada.

No processo PCI, o combustível pulverizado é injetado no duto de entrada do ar pré-aquecido de 900 a 1200 °C por uma lança de injeção de pequeno diâmetro. A velocidade do ar no duto de ar e na ventaneira é de 150 a 250 m/s, sob pressões de

2 a 4 bar. As partículas de carvão pulverizado, abaixo de 100 μm , são aquecidas instantaneamente, com taxas de aquecimento de 10^5 a 10^6 $^\circ\text{C/s}$, sofrendo pirólise, ignição e combustão num intervalo de tempo de 10 a 40 ms (ARIYAMA, 2000). O curto tempo de residência na zona de combustão, apesar das altas temperaturas e pressões, faz com que a combustão do carvão seja geralmente incompleta (CARPENTER, 2006).

Na Figura 2, pode ser visto um esquema do processo PCI, com os perfis de variação das concentrações de O_2 , CO_2 e CO , indicando a sequência de reações de pirólise, combustão e geração de CO na *raceway*.

Uma das questões operacionais mais importantes no PCI é viabilizar-se o aumento da taxa de injeção de combustíveis auxiliares sem aumentar a quantidade de char, o resíduo sólido formado pelas cinzas e carbono residual da combustão incompleta, dentro do alto-forno (DENO e OKUNO, 2000, HUTNY et al, 1996). Este aumento causa sérios problemas como a deposição do char no leito e a redução da sua permeabilidade, uma distribuição indesejada do fluxo ascendente de gases por formação de canais preferenciais e, com isso, dos perfis de temperatura, um arrastamento excessivo de finos de char com o gás de topo e uma maior erosão do coque.

Entre os usuários do PCI, considera-se que, para taxas de injeção de carvão de até 150 kg carvão por tonelada de gusa, não há necessidade de alterações importantes no processo do alto-forno. Para evitar perdas de produção e redução da vida útil do forno, a adoção de taxas maiores de injeção requer mudanças de processo (CARPENTER, 2006). O uso de carvões com elevado teor de voláteis, bem como os aumentos da temperatura de pré-aquecimento e do teor de oxigênio no ar insuflado são medidas adotadas para este fim.

O aumento da taxa de injeção eleva a relação de carga entre minério e coque na alimentação de topo, o que tende a alterar a distribuição da carga na seção transversal do alto-forno. São necessárias mudanças no processo de carregamento para evitar que o ângulo de carga diminua e que o coque se acumule junto às paredes, com aumento do fluxo gasoso na região periférica, pois isto provocaria um maior consumo específico de carbono e uma redução na produtividade do alto-forno (CASTRO et al., 1997).

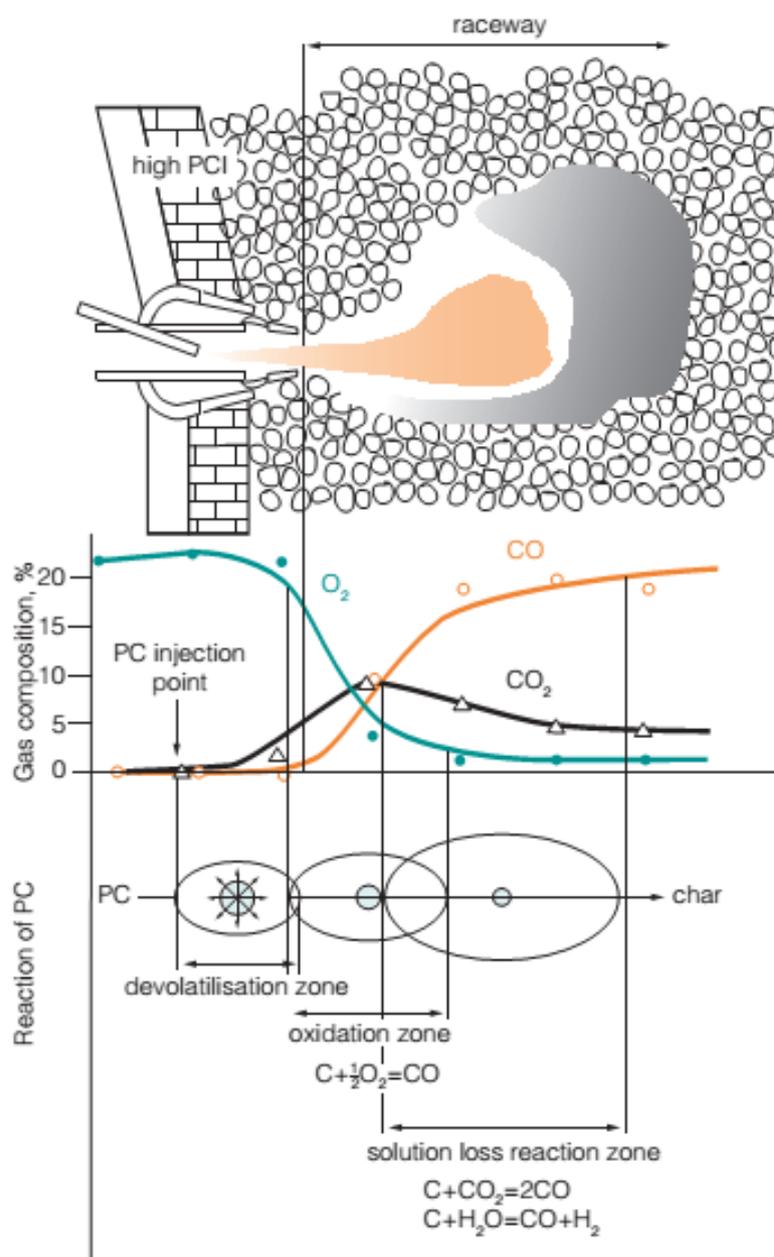


Figura 2: Reações Químicas na “Raceway”.

Fonte: CARPENTER, 2006.

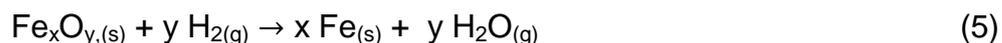
Na zona de combustão, o oxigênio insuflado, que é insuficiente para o consumo total do carbono do coque e dos combustíveis auxiliares injetados, é consumido rapidamente, remanescendo carbono residual no char. Este carbono residual deverá ser consumido pela reação de Boudouard, de gaseificação de

carbono com o CO₂, gerando CO no final da zona de combustão e início da cuba do alto-forno. Na parte inferior do alto-forno, parte do char será incorporado ao metal e à escória fundidos. O CO gerado e a parcela remanescente do char serão incorporados ao fluxo gasoso ascendente, ainda rico em CO₂. Na parte superior do alto-forno, ocorrem reações sucessivas de gaseificação com CO₂, tanto do carbono do char arrastado quanto do coque descendente, formando CO, que novamente se converterá em CO₂, através das reações de redução dos óxidos de ferro do minério. Uma eficiência elevada de combustão e um char mais reativo aumentarão a eficiência de consumo total do carbono, já que a taxa da reação de gaseificação é muito menor do que a taxa de combustão (LU et al. 2002; WU et al., 2007).

Outro efeito importante do aumento da taxa de injeção é a diminuição da eficiência de combustão e a geração de um maior volume de finos de char deixando a zona de combustão. Parte destes finos pode se acumular 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, conhecida como “homem morto” (*dead man*), 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).

O processo PCI, ao promover uma redução do volume de coque, exige com isso um aumento de sua qualidade quanto à resistência mecânica, pois ocorre um aumento de seu tempo de residência e, assim, uma maior degradação mecânica por abrasão. O emprego de um coque mais resistente irá evitar um aumento de fragmentação (CARPENTER, 2006). A injeção de combustíveis auxiliares provoca um aumento do fluxo de gases ascendentes, tanto maior quanto maior o teor de voláteis do carvão injetado (OLIVEIRA et al., 1996). O aumento do teor de hidrogênio, característica em especial dos carvões ricos em voláteis, promove uma maior participação das reações de redução dos óxidos de ferro por hidrogênio (HUTNY et al, 1991). Estas reações sucessivas de redução gradativa dos óxidos de ferro a ferro metálico podem ser englobadas numa reação geral, conforme a

Equação 5:



Na indústria siderúrgica mundial, nas últimas décadas, as taxas de injeção de carvão pulverizado vêm sendo aumentadas na maioria dos altos-fornos, também nos brasileiros, atingindo valores de 150 a 220 kg/t gusa (BABICH *et al*, 2008; CARPENTER, 2006).

3.2 A COMBUSTÃO DO CARVÃO MINERAL

3.2.1 O Carvão Mineral

O carvão mineral é um mineral de origem fóssil, formado há milhões de anos por soterramento de matéria vegetal que sofreu inicialmente transformações por ação biológica em condições anaeróbias e, depois, por ação de pressões e temperaturas elevadas causadas por movimentação geológica. Dessa forma, a matéria vegetal original é convertida na matéria orgânica carbonosa componente do carvão. Já a matéria mineral constituinte do vegetal e a proveniente do material de soterramento formam a matéria mineral componente do carvão. Na combustão, a matéria carbonosa reage quimicamente com o oxigênio, gerando gases de combustão e calor, enquanto que a matéria mineral se converte nas cinzas de combustão, através de reações de desidratação, de oxidação e de decomposição dos minerais originais.

As partículas de carvão são assim formadas por uma matriz complexa de material combustível e de material não combustível. Seu formato pode variar, desde quase isométrico até lamelar. A proporção entre matéria carbonosa e matéria mineral é variável e depende principalmente da natureza do material vegetal original e da forma e grau de deposição do material mineral de soterramento. Quando o teor de matéria mineral do carvão retirado da mina é elevado para o tipo de consumo pretendido, pode-se em geral reduzi-lo por remoção parcial da matéria mineral através de processos baseados na diferença de densidade entre a matéria carbonosa e a matéria mineral. Estes processos são conhecidos como processos de beneficiamento gravimétrico.

O processo biológico-geológico de conversão gradativa da matéria vegetal original em matéria carbonosa do carvão é denominado de processo de

carbonificação do carvão. Ao longo deste processo, há uma redução gradativa dos teores de oxigênio e hidrogênio e, com isso, um aumento gradativo do teor de carbono. O grau de carbonificação, ou seja, do avanço da conversão da matéria vegetal original em matéria carbonosa praticamente só constituída por carbono define uma escala de classificação conhecida como “rank” do carvão, que vai desde os linhitos e carvões subetuminosos com altos teores de matéria volátil até os antracitos, quase desprovidos de matéria volátil, com diversas classificações intermediárias.

A matéria volátil resulta da decomposição parcial da matriz carbonosa pelo calor durante o processo de aquecimento do carvão até temperaturas elevadas. Quanto maiores os teores de oxigênio e carbono na estrutura, mais suscetível ela será ao rompimento de parte das ligações químicas existentes, com a formação e liberação das moléculas gasosas que formarão a dita matéria volátil. Em geral, a reatividade e a combustibilidade dos carvões são tanto maiores quanto menor for o seu grau de carbonificação, ou seja, quanto maior o seu teor de matéria volátil.

Os carvões brasileiros são, em sua maioria, carvões alto-voláteis com teores elevados de matéria mineral presente na sua matriz carbonosa. A redução do teor da matéria mineral por processos de beneficiamento, quando possível, apresenta baixos rendimentos na fração mais rica em matéria carbonosa. Por isso, a viabilização de seu uso para PCI deverá se basear na sua participação em misturas com outros combustíveis com teores muito baixos de matéria mineral, como carvões minerais importados, carvões vegetais ou coque de petróleo.

3.2.2 Fenômenos da Combustão de Carvão

A combustão de carvão ocorre através de reações químicas heterogêneas do tipo gás-sólido. Por isso as taxas de combustão são fortemente influenciadas pela área total de contato entre as fases sólida e gasosa. Quanto menores as partículas de carvão, maior será a área específica de contato e maior a taxa de combustão. Na combustão sob forma pulverizada, é usual injetar-se carvões com granulometria menor que 0,2 mm para se obter altas taxas de combustão e alta eficiência de consumo do carbono.

Uma reação heterogênea gás-sólido pode ser caracterizada como um processo cujo mecanismo é constituído por etapas sucessivas ocorrendo em série. Quando uma das etapas apresenta um coeficiente de resistência significativamente maior que as demais, é a sua taxa menor que define a taxa global da reação (FOGLER, 1992). Estas etapas são assim agrupadas:

- **Etapa 1** – Difusão dos reagentes gasosos até a superfície de reação através da camada-limite gasosa até a superfície externa da partícula; quando a reação ocorrer ao longo da superfície dos poros do sólido, a difusão nos poros, que é geralmente mais lenta, deve também ser considerada.

- **Etapa 2** – Reação dos reagentes gasosos na superfície ativa do sólido. Esta etapa engloba as taxas de adsorção dos reagentes na superfície sólida, a taxa de reação química superficial e a taxa de dessorção dos produtos gasosos.

- **Etapa 3** – Difusão dos produtos gasosos da superfície de reação através dos poros, quando for o caso, e através da camada-limite gasosa.

As taxas de difusão através da camada-limite, de difusão através dos poros, de adsorção e dessorção dos gases e da reação química superficial são influenciadas de forma diversa pelas variáveis de processo: temperatura, pressão, natureza e concentração dos reagentes, bem como das características de escoamento relativo das fases. Alterações nestes parâmetros podem causar alterações significativas nas resistências específicas de cada etapa e, assim, alterar o controle da taxa global do processo de uma etapa para outra.

3.2.3 Combustão do Carvão no Processo PCI

No processo PCI, o carvão injetado arrastado pelo fluxo de ar, pré-aquecido a 1000 – 1200 °C e enriquecido com 1 a 6 % de oxigênio, passa por etapas sequenciais de pré-aquecimento, desvolatilização por pirólise a partir de 350 a 400 °C, combustão dos gases de pirólise, e após pela combustão do char resultante da pirólise.

O pré-aquecimento e a pirólise do carvão são etapas fortemente endotérmicas e sua taxa é controlada pela taxa de transferência de calor dos gases para as partículas sólidas. Como as partículas estão finamente dispersas nos gases

pré-aquecidos, escoando em regime fortemente turbulento, estas taxas são muito elevadas e o processo se completa em poucos milissegundos.

A combustão dos gases de pirólise, fortemente exotérmica, é igualmente rápida pois a elevada turbulência provoca a mistura rápida e eficiente com o ar pré-aquecido, pressurizado e enriquecido com oxigênio. O calor gerado pela combustão quase instantânea dos gases promove o aquecimento do char de pirólise e sua ignição.

A combustão do char é significativamente mais lenta do que a dos gases de pirólise e não se completa durante o seu curto tempo de residência na zona de combustão do alto-forno.

Como as taxas de transferência de calor e massa e das reações químicas em sistemas heterogêneos gás-sólido são fortemente dependentes do tamanho das partículas sólidas, ocorre superposição parcial das etapas acima descritas nos carvões injetados em função de sua distribuição granulométrica.

Na análise das etapas controladoras da taxa de combustão do char, definem-se três regimes de combustão dependendo das etapas limitantes da reação, descritos acima (CARPENTER, 2006; SMOOT e SMITH, 1985; WU, 2005):

- **Regime I** - Em temperaturas abaixo de 600°C para partículas finas e até em temperaturas mais elevadas para partículas grandes, a combustão do char é controlada pela taxa das reações químicas, pois a velocidade de chegada dos gases reagentes por difusão através da camada limite e dos poros do char é maior do que a sua taxa de consumo pela reação química.

- **Regime II** - Em temperaturas entre 600 e 800°C, as taxas de transporte dos gases por difusão são da mesma ordem de grandeza das taxas de consumo pelas reações químicas. Nesse caso, a combustão do char é controlada tanto pela reação química quanto pela difusão do oxigênio nos poros das partículas de char. Como a difusão através da camada limite é mais rápida do que a difusão nos poros, a maior parte da reação se dá na superfície das partículas de char.

- **Regime III** - Em temperaturas acima de 800°C, as reações de combustão são muito rápidas, de forma que os gases reagentes oxidam imediatamente o carbono ao chegarem à superfície externa da partícula de char. Neste regime, a taxa

de combustão do char é controlada inicialmente pela difusão externa do oxigênio através da camada limite e, após, pela difusão do oxigênio através dos poros.

Na zona de combustão do alto-forno, caracterizada por temperaturas muito acima dos 1000°C, a taxa de combustão do char é controlada pela taxa de difusão do oxigênio até a superfície do char, logo é favorecida por regimes de escoamento turbulento dos gases, mas será pouco influenciada pelo aumento de temperatura. O char arrastado até a cuba, onde as temperaturas são menores, provavelmente terá sua oxidação controlada pelas taxas cinéticas das reações químicas (WU *et al.*, 2007).

Como o tempo de permanência do carvão na zona de combustão é muito pequeno, da ordem de poucos centésimos de segundo, é essencial que os carvões injetados tenham alta combustibilidade. Isso viabiliza sua injeção em taxas mássicas elevadas que permitem, através da sua combustão em conjunto com o coque, altas densidades volumétricas de geração de calor, necessárias para atingir as temperaturas de fusão do ferro e da escória e para fornecer todo o calor de aquecimento da corrente ascendente de gases, necessário tanto para a redução endotérmica do minério de ferro como para o aquecimento das cargas sólidas até as temperaturas de redução.

O fenômeno de combustão de uma partícula de carvão durante o processo de injeção no alto-forno ocorre em etapas sucessivas, como se vê na Figura 3.

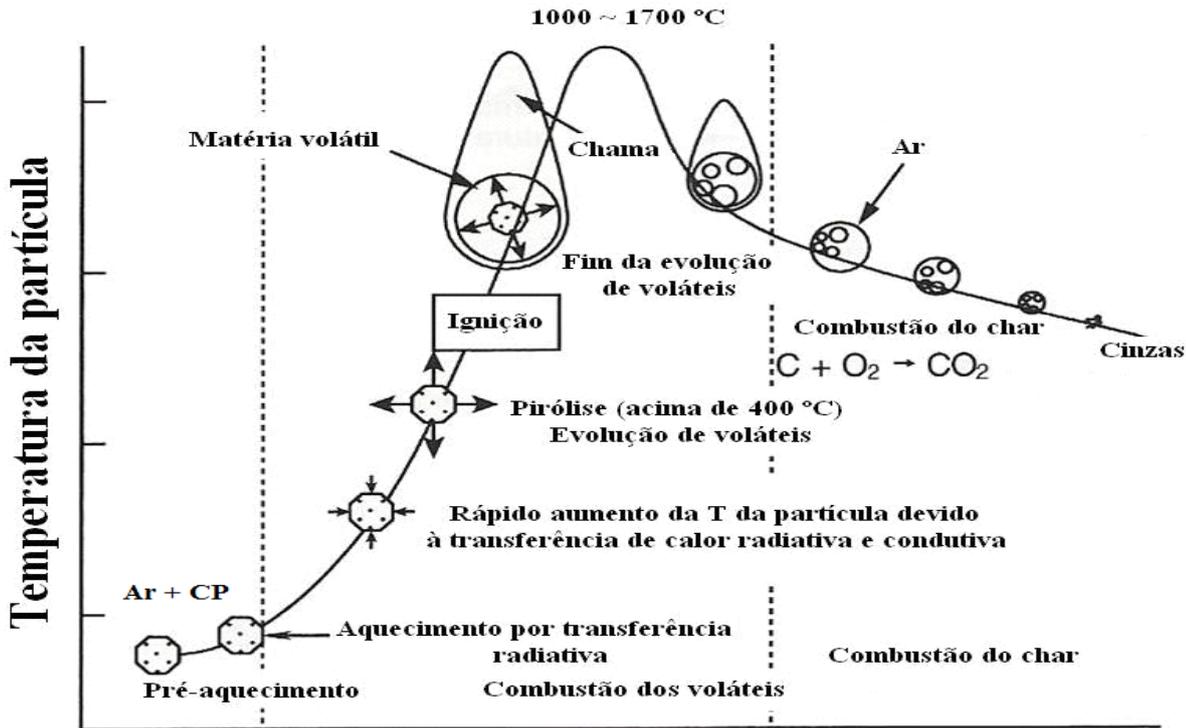


Figura 3: Etapas da combustão de carvão empregado para PCI.

Fonte: Adaptado de NARUSE e INADA, 2000.

As partículas de carvão injetadas pelas ventaneiras são rapidamente pré-aquecidas por radiação, promovendo sua pirólise e liberação de matéria volátil, com ignição imediata dos gases e das partículas de char. Pelas taxas elevadas de aquecimento, a combustão do carbono fixo do char já pode ocorrer junto com a dos voláteis. Com o progresso da combustão, a temperatura da partícula aumenta rapidamente e, após quase toda a matéria volátil ter sido liberada, a combustão do char se torna o processo dominante. A combustão dos voláteis é uma reação gasosa homogênea pois os reagentes são instantaneamente misturados pela alta turbulência do fluxo gasoso e é muito mais rápida que a reação heterogênea gás-sólido de combustão do char. O teor de carbono residual nas cinzas depende da combustibilidade do carvão e do seu tempo de contato com o oxigênio (NARUSE e INADA, 2000).

3.2.4 Propriedades de carvões para PCI

A curta permanência dos carvões injetados na zona de combustão é o principal obstáculo técnico para se atingir taxas elevadas de injeção de carvões pulverizados nos altos-fornos, acima de 150 a 200 kg/t gusa, pois resulta quase sempre em combustão incompleta do carbono fixo do char (AL-OMARI, 2004). Carvões com combustibilidade elevada permitirão uma combustão mais completa do carbono fixo. A matéria mineral dos carvões injetados será incorporada aos produtos do alto-forno. Parâmetros críticos são o teor de cinzas, de enxofre e de álcalis.

Apesar das restrições mencionadas, a gama de carvões que pode ser usada para PCI é maior do que a de carvões para coqueificação, o que possibilita a injeção de carvões de menor custo. Carvões diferentes, desde os subetuminosos alto-voláteis até antracitos, vêm sendo empregados com sucesso. As características ótimas de um carvão para injeção dependem também das características construtivas e operacionais do alto-forno em que será utilizado. Os carvões a serem utilizados serão aqueles que fornecerem o melhor custo-benefício para aquele alto-forno e que apresentem a maior eficiência de combustão possível (CARPENTER, 2006). Hutny, Lee e Price (1991) agruparam os parâmetros que afetam a eficiência de combustão do carvão no alto-forno em três classes: propriedades dos carvões, condições da combustão e projeto do equipamento.

As propriedades comumente usadas para avaliar carvões para uso em PCI estão resumidas a seguir, baseadas nas literaturas de Unsworth, Barratt e Roberts (1991), Babich et al. (1996), Hutny et al. (1996), Carpenter (2006) e Assis (2008).

Matéria Volátil. Carvões alto-voláteis são mais reativos e terão combustão mais completa, porém carvões baixo-voláteis apresentam maior teor de carbono, são mais energéticos e permitem maiores taxas de substituição do coque. Nas misturas para PCI, busca-se uma proporção ótima entre estes carvões. Como os carvões médio-voláteis são geralmente coqueificáveis e, por isso, de custo mais elevado, prefere-se injetar misturas de carvões alto-voláteis e baixo-voláteis de menor custo. O teor ótimo de Matéria Volátil depende da tecnologia de PCI utilizada em cada alto-forno; situando-se geralmente entre 20 e 35%, em base seca isenta de cinzas (CARPENTER, 2006).

Teor de carbono. Como mencionado acima, a taxa de substituição de coque cresce com o teor de carbono dos combustíveis auxiliares injetados.

Teor de hidrogênio. Um aumento no teor de hidrogênio na composição dos gases ascendentes reduz a queda de pressão no leito de coque e minério, pois diminui a densidade da mistura gasosa, permitindo um aumento do fluxo para uma mesma queda de pressão. As reações de redução com o hidrogênio são mais rápidas e podem, assim, ocorrer a temperaturas menores do que as com CO. O hidrogênio apresenta maior difusividade que o CO e o CO₂, o que contribui para aumentar as taxas das reações na parte superior do alto-forno quando a resistência difusiva também influir nas taxas globais destas reações.

Poder calorífico. Quanto maior o poder calorífico de um carvão, menor a quantidade de carvão necessária energeticamente para substituir um kg de coque. Maior poder calorífico permite alcançarem-se maiores taxas de substituição do coque.

Teor de umidade. Teores maiores de umidade reduzem o poder calorífico efetivo do carvão, dificultam seu transporte e manuseio e afetam a eficiência do processo de moagem. Teores menores de umidade possibilitam maiores taxas de injeção. Os carvões alto-voláteis têm maior combustibilidade que os carvões baixo-voláteis, mas também apresentam geralmente teores de umidade mais elevados. Por isso, para seu uso mais eficiente, pode ser necessária uma secagem prévia ou então sua mistura com carvões de menores teores de umidade. Em geral, um teor de umidade menor que 10% é o ideal para carvões para PCI.

Teor de cinzas. O teor de cinzas está relacionado com a quantidade e composição da matéria mineral presente no carvão. Como cinzas elevadas prejudicam a combustibilidade do carvão, pois dificultam o acesso ao carbono fixo nos poros do char para fins de injeção, deseja-se um teor máximo de cinzas de 10%.

Teor de enxofre. O enxofre é um componente indesejável em qualquer combustível, pois sua combustão gera óxidos ácidos gasosos, ditos SO_x, que são nocivos ao ambiente e cuja emissão é limitada pelas normas de proteção ambiental. Além disso, sua presença no ferro gusa causará fragilidade do aço, reduzindo sua qualidade. A escória de alto-forno é um bom agente de remoção do enxofre pois tem elevado teor de óxido de cálcio, proveniente do calcário adicionado como fundente

da escória. O óxido de cálcio reage com os gases SO_x e os incorpora à escória. Para evitar que o teor de enxofre no forno aumente com a substituição parcial do coque por combustíveis injetados, o teor de enxofre destes combustíveis auxiliares é limitado a valores de até 1%.

Índice de moabilidade (HGI – *Hardgrove Index*). O HGI é um índice obtido a partir de um teste laboratorial padronizado de facilidade de moagem. Valores muito elevados, acima de 90, caracterizam carvões de alta friabilidade, com baixo consumo energético na moagem, porém formadores de pós finos por atrito mecânico dentro do alto-forno. Valores muito baixos identificam uma moagem mais difícil, de alto consumo energético. Por isso, para PCI, dá-se preferência a carvões com valores intermediários de HGI, entre 40 e 70.

Teor de álcalis. Os elementos alcalinos, em especial, o sódio e o potássio, são danosos ao alto-forno. Eles recirculam dentro do alto-forno pois são fundidos e parcialmente vaporizados nas zonas inferiores mais quentes e após condensados nas zonas superiores mais frias e também nas paredes refratárias, formando incrustações, o que pode causar restrições ao escoamento dos gases. Agem também como catalisadores da reação de Boudouard, podendo aumentar a geração de finos de coque. A remoção simultânea de álcalis e enxofre pela escória é extremamente difícil, pois para eliminar os álcalis são necessárias uma menor basicidade e uma menor temperatura de chama, condições opostas às requeridas para a remoção eficiente do enxofre

Composição maceral e *rank*. Os macerais são os microconstituintes orgânicos que compõem o carvão, sendo gerados a partir das alterações estruturais e químicas sofridas pela matéria vegetal durante o processo de carbonificação. Diferentes estruturas vegetais originais e diferentes processos geotérmicos de pressão e temperatura favorecem a formação de diferentes estruturas carbonosas, ou seja, diferentes macerais. Algumas variações químicas e físicas que ocorrem no carvão podem ser explicadas em termos de sua composição maceral e de seu *rank*. Os macerais são distinguíveis uns dos outros em microscópio ótico de luz refletida de acordo com sua coloração e morfologia, sendo classificados pela Comissão Internacional de Estudos sobre Carvão e Petrologia (ICCP) em três grupos principais, vitrinita, liptinita e inertinita (ICCP, 1963; ULHÔA e NORA, 1991). O poder

refletor da vitrinita (%Rr), determinado em microscópio de luz polarizada, é o parâmetro mais utilizado para a determinação do *rank* do carvão. Quanto maior o *rank*, menor é o teor de voláteis, maior é a refletância e mais organizada é a estrutura. Macerais de mesma refletância apresentam reatividades similares. A reatividade decresce com o aumento do *rank* do carvão, o que se deve à redução da porosidade e dos sítios ativos de carbono. Porém não há relação entre a composição maceral e a combustibilidade do carvão.

Segundo Kalkreuth et al. (2005) no Brasil são utilizadas misturas de carvões para PCI, os quais são em sua totalidade importados e apresentam uma grande variação de propriedades: 10,0 – 40,3% em massa de matéria volátil, 68,2 – 91,0% em massa de carbono, HGI de 44 – 85 e teor de cinzas inferior a 11% em massa. De um modo geral, o carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno deve ter propriedades adequadas para se obter uma boa taxa de substituição de carbono do coque sem comprometer a estabilidade de funcionamento do reator, mesmo com elevadas taxas de injeção.

3.3 AVALIAÇÃO DA COMBUSTIBILIDADE DE CARVÕES PARA INJEÇÃO

3.3.1 Técnicas de Avaliação da Combustibilidade

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 (MACHADO *et al.*, 2013). Uma alternativa aos estudos práticos é a utilização de modelos computacionais de combustão de carvão na zona de combustão do alto-forno (GUO *et al.*, 2005; SHEN *et al.*, 2009), porém é sempre necessária a validação experimental dos resultados para otimizar os modelos.

Uma alternativa factível de estudo do ponto de vista técnico é a avaliação da combustão empregando equipamentos de escala laboratório/piloto. Alguns equipamentos tipicamente utilizados em laboratório para este fim são

termobalanças, fornos de queda livre e simuladores da zona de combustão dos altos-fornos.

Termobalanças são reatores de escala laboratorial de leito fixo usados para análise termogravimétrica (TGA). Nesta técnica, a massa da amostra é continuamente monitorada em relação ao tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é programada. Termobalanças têm sido frequentemente utilizadas para avaliar o comportamento de combustão e gaseificação de combustíveis para PCI (OSÓRIO et al., 2006, POHLMANN et al., 2011, BARBIERI, 2013), porém não são apropriadas para simular as condições extremas que prevalecem nos processos de combustão e gaseificação.

Fornos de queda livre são equipamentos em escala de laboratório formados por um forno tubular vertical, operado a temperaturas entre 1300 e 1800 °C. O tempo de residência típico nesse está na ordem de 0,1 s, promovendo taxas de aquecimento das partículas de combustível de no mínimo 10^4 K/s (OSÓRIO et al., 2006). Experimentos em fornos de queda livre são usados para avaliar a combustibilidade de carvões principalmente para o uso em caldeiras, mas também têm sido utilizados para avaliar carvões visando PCI devido às condições similares em alguns aspectos. Por serem os resultados baseados na análise das cinzas produzidas, esses equipamentos não são adequados para avaliar a combustão de misturas de carvão (OSÓRIO et al., 2006).

Na Suécia há um alto-forno experimental em atividade que pertence à empresa LKAB. O reator está localizado na cidade de Luleå e foi construído em 1997 para o desenvolvimento de *pellets* de minério de ferro. O alto-forno experimental tem uma produtividade diária de 30 a 40 t/dia e é equipado com sistema para injeção de carvão pulverizado, óleo e outros materiais. O volume de trabalho é de $8,2 \text{ m}^3$, o diâmetro ao nível das ventaneiras é de 1,2 m e a altura a partir do nível das ventaneiras é de 6 m. As ventaneiras têm diâmetro de 54 mm e a velocidade de sopro é de 150 m/s (DAHLSTEDT, HALIN e WIKSTRÖM, 2000).

Mesmo que o alto-forno experimental da LKAB forneça dados operacionais úteis, existem limitações financeiras e operacionais ligadas à construção e utilização rotineira de um reator sofisticado como esse. Por isso, outros equipamentos mais

simples são comumente utilizados para a avaliação da combustibilidade e reatividade de carvões e chars, tais como analisadores termogravimétricos (termobalanças) (BEAMISH *et al.*, 1998; RUBIERA *et al.*, 2002; GHIGGI *et al.*, 2007; OSÓRIO *et al.*, 2008; KALKREUTH *et al.*, 2013) e fornos de queda livre (DTF – *Drop Tube Furnace*) (ALVAREZ *et al.*, 1997; LU, SAHAJWALLA e HARRIS, 2000; LI *et al.*, 2012, 2013 e 2014; WU *et al.*, 2003; LE MANQUAIS *et al.*, 2009). Estas técnicas não simulam as condições reais dos processos industriais tão bem como um alto-forno experimental, mas permitem fazer avaliações comparativas, fornecendo subsídio para a seleção de carvões para injeção. Um tipo mais adequado de equipamento para avaliação da combustão visando PCI são os simuladores da zona de combustão do alto-forno (ou simuladores de PCI), sobre os quais trata a seção seguinte.

3.3.2 Simuladores da Zona de Combustão do Alto-Forno

Os simuladores da zona de combustão são equipamentos que operam em condições muito próximas daquelas encontradas em um alto-forno. Comparando-se um simulador com um DTF, o DTF fornece um tempo de residência maior e excesso de O₂, porém com menor temperatura e menor taxa de aquecimento (LI *et al.*, 2013). A seguir serão apresentados estudos realizados em simuladores da zona de combustão em escala laboratorial e piloto. Os trabalhos foram agrupados de acordo com o local da pesquisa. Detalhes técnicos do *design* e operação dos equipamentos podem ser encontrados nas referências citadas. Em especial, recomenda-se a consulta às revisões bibliográficas apresentadas nas outras duas teses de doutorado também oriundas como esta dos trabalhos de desenvolvimento do simulador de PCI do LASID-UFRGS (MACHADO, 2017, BARBIERI, 2018).

3.3.2.1 Simulador de Combustão de Carvão da Universidade Técnica de Aachen

O equipamento de combustão do Instituto de Siderurgia da Universidade Técnica de Aachen (IEHK/RWTH), na Alemanha, simula a injeção de carvão até 20 cm dentro da zona de combustão, incluindo a injeção através da lança, o aquecimento ultrarrápido e a combustão. Vamvuka *et al.* (1996) verificaram

que a combustibilidade de carvões foi muito dependente do *rank* e da taxa de injeção. O uso de partículas maiores em geral melhorou a combustibilidade para razões oxigênio/carvão > 2 , ao passo que as partículas menores queimaram melhor para razões oxigênio/carvão < 2 .

Gudenau *et al.* (2003) avaliaram também a combustão de sucata automotiva leve laminada, resíduos de plásticos, char e de misturas desses materiais com carvão alemão. Eles concluíram que o char é o material de pior performance, o que foi atribuído ao seu carbono não reativo e ao alto teor de cinzas encontrado. Os álcalis adicionados pela injeção de resíduos e materiais recicláveis não foram muito prejudiciais do ponto de vista do aumento de consumo de coque por ação catalítica. Isto porque o coque reage preferencialmente a partir de sua superfície, o que leva a chances maiores de permanência de pedaços de grande tamanho. As cinzas dos materiais injetados formaram pequenos glóbulos na superfície do coque, o que acabou por protegê-los da degradação. Contudo, para as partes mais baixas do alto-forno, é sugerido que a fragmentação do coque deva ser levada em conta como um fator obstrutivo à permeabilidade.

A combustibilidade do carvão brasileiro da Mina do Leão (RS) foi avaliada em um simulador da zona de combustão, juntamente com carvões importados, carvão vegetal e misturas binárias dos mesmos (MACHADO, 2009). A reatividade ao CO_2 foi avaliada em termobalança e em forno Tammann. Apesar de terem sido utilizados equipamentos diferentes, os resultados obtidos apresentaram considerável convergência. Os teores de álcalis do carvão brasileiro foram maiores, embora este carvão tenha apresentado baixo teor de fósforo. A desmineralização do carvão brasileiro reduziu sua reatividade durante a gaseificação. A reatividade do carvão brasileiro ocupou uma posição intermediária entre a dos carvões importados (menos reativos) e a da biomassa (mais reativa). A mistura entre carvão brasileiro e carvão vegetal foi menos reativa que as matérias-primas individuais, o que foi atribuído à possível formação de um composto eutético de baixo ponto de fusão.

3.3.2.2 Simuladores da zona de combustão da BHP e Blue Scope

A Broken Hill Company, a Blue Scope Steel e a BHP Billiton desenvolveram em conjunto com a Universidade de Newcastle na Austrália uma sucessão de simuladores desde a década de 80.

O desempenho de combustão de carvão foi medido por Rogers *et al.* (2011) em um desses simuladores em escala piloto para fornecer uma simulação físico-química da combustão de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno. Em geral, para uma lança coaxial refrigerada a ar, o desempenho de combustão aumentou com o teor de matéria volátil e revelou um fraco aumento com o aumento da razão O/C (decréscimo da taxa de injeção). Para carvões de teores de matéria volátil similares, demonstrou-se que um maior teor de inertinita no carvão aumenta a eficiência da combustão.

Li *et al.* (2012 e 2013) fizeram comparações de resultados de combustão em um forno DTF e em um simulador de PCI. O tempo de residência do DTF foi de cerca de 200 ms e do simulador de PCI foi de cerca de 20 ms. A eficiência de combustão nos dois reatores aumentou quase linearmente com o teor de matéria volátil. Para carvões ricos em vitrinita o desempenho independeu do equipamento. Em contraste, o carvão rico em inertinita apresentou eficiência de combustão menor no DTF. A eficiência de combustão dos carvões no DTF é mais sensível ao teor de matéria volátil. Em trabalho posterior (Li *et al.*, 2014) foi verificado que a eficiência de combustão dos carvões baixo voláteis testados ficou acima do esperado pelo seu teor de matéria volátil. Isto foi atribuído à distribuição granulométrica mais estreita destes carvões e a uma maior fragmentação de suas partículas durante a combustão no simulador.

3.3.2.3 Simulador da zona de combustão da Nippon Steel Corporation

Experimentos de combustão foram executados no Japão num combustor vertical com e sem coque por Ueno *et al.* (1993). A eficiência de combustão foi proporcional à temperatura de sopro, indicando que o incremento da taxa de reação do char foi devido à uma maior desvolatilização. Um enriquecimento moderado do ar com O₂ também aumentou a eficiência de combustão. Porém um enriquecimento

com O₂ não produziu um bom efeito. Um pequeno efeito positivo foi observado com a adição de vapor. Com o progresso da pirólise as partículas de carvão pulverizado se tornaram esféricas, com um grande número de poros em seu interior e, por isso, a reatividade do char foi estimada ser maior do que a do coque.

3.3.2.4 Simulador da Zona de Combustão da Toyohashi University of Technology

Khairil *et al.* (2001), na Universidade de Tecnologia de Toyohashi, no Japão, realizaram experimentos de combustão de carvão pulverizado em um reator horizontal com um pré-combustor que produzia ar enriquecido com oxigênio a alta temperatura. A taxa de evolução de matéria volátil independeu do tipo de carvão injetado, mas dependeu da temperatura da partícula. A conversão do carbono fixo dependeu do tipo de estrutura do char. Para carvões que formaram char tipo rede um aumento da temperatura do ar nem sempre afetou a conversão. Para carvões que geraram char tipo balão, por outro lado, a conversão diminuiu com o aumento da temperatura do ar. A área superficial dos chars gerados foi diretamente proporcional ao enriquecimento de oxigênio, o que sugere que o enriquecimento contribui para o aumento da reatividade do char devido à gaseificação por CO₂ e H₂O.

3.3.2.5 Instalação de Teste de Combustão da Kobe Steel

A simulação da injeção de carvão pulverizado em alto-forno foi realizada em um forno túnel de 1,2 MW por Suzuki *et al.* (1984) na instalação de teste da Sumitomo, no Japão. As taxas de aquecimento eram da ordem de $1,0 \times 10^6$ a $1,5 \times 10^6$ K/s e o tempo de residência inferior a 10 ms. Um carvão alto volátil queimou tão bem quanto óleo. Já a eficiência de combustão de carvões médio e baixo volátil foi de apenas 60 a 80 %. A combustibilidade cresceu com o teor de matéria volátil, o tempo de residência, o excesso de ar e temperatura do mesmo. Os resultados foram razoavelmente bem confirmados por experimentos em alto-forno. Em trabalho posterior (SUZUKI *et al.*, 1990) foi verificado que a desvolatilização afeta fortemente a eficiência de combustão na região correspondente ao início da zona de combustão, concordando com o resultado obtido por Bortz (1983).

3.3.2.6 Simulador da Zona de Combustão da NKK Corporation

Ariyama *et al.* (1994) utilizaram o simulador da NKK Corporation, no Japão, para avaliar o efeito da dispersão das partículas de carvão pulverizado em um modelo a quente de injeção com uma ventaneira e uma coluna de coque. O carvão injetado a partir de uma lança simples se movimentou como um grupo de partículas, resultando em um estado de combustão não-uniforme em termos de espaço e tempo. No caso da lança dupla, o estado de não-uniformidade foi reduzido pela melhor dispersão do carvão. Portanto, a dispersão do carvão tem um papel importante na sua combustibilidade, sendo que lanças duplas são as que promovem maior eficiência de combustão. Este resultado foi confirmado por Matsuzaki *et al.* (1997), constatando que o efeito da lança dupla é particularmente notável quando o excesso de ar do sopro é baixo.

3.3.2.7 Simulador da Zona de Combustão com Leito de Coque da Sumitomo Metal Industries

No simulador da Sumitomo, no Japão, Yamagata *et al.* (1992) investigaram o efeito da taxa de injeção, do tipo do carvão e de sua granulometria no estado interno do alto-forno utilizando um modelo físico a quente com coque e modelos matemáticos. Uma maior taxa de injeção reduziu a combustibilidade a até 70 % no caso de uma taxa de 300 kg/t gusa. Com o decréscimo da matéria volátil no carvão, a combustibilidade foi reduzida a até 60%. Com o aumento da granulometria a combustibilidade foi reduzida em até 30% para um tamanho de partícula de 285 μm a uma taxa de 200 kg/t gusa e para um tamanho de 48 μm a 300 kg/t gusa. A combustibilidade poderia ser aumentada pelo consumo de char via reação de Boudouard, porém este efeito se mostrou insuficiente na taxa de injeção de 300 kg/t gusa.

3.3.2.8 Simulador da Zona de Combustão do Imperial College

No Imperial College, em Londres, Inglaterra, Pipatmanomai *et al.* (2003) utilizaram um reator tipo *wiremesh* para simular a zona de combustão do alto-forno.

Este reator foi equipado com um sistema de injeção de pulsos curtos (5-500 ms) de ar enriquecido com O_2 . Foram avaliadas a pirólise, a combustão do char e sua gaseificação com CO_2 . A taxa máxima de desvolatilização foi alcançada dentro do período de aquecimento, correspondente a um tempo de cerca de 300 ms e a uma taxa de 5000 °C/min. A extensão da combustão foi limitada pela quantidade de O_2 fornecida, ou seja, por difusão. Os resultados indicaram que a extensão da combustão e gaseificação do char na zona de combustão provavelmente são baixas. Contudo, uma proporção significativa do carbono do char irá ser gaseificada dentro do leito do alto-forno.

3.3.2.9 Simulador da Zona de Combustão da British Steel

Atkinson e Willmers (1990) avaliaram a injeção de carvão pulverizado no simulador de PCI da British Steel, na Inglaterra, com duas toneladas de coque. A injeção de carvão alto-volátil causou um rápido aumento na pressão do sopro e uma redução na temperatura da zona de combustão de até 230 °C. Na injeção de carvão baixo volátil os níveis de CO_2 próximos à ventaneira não aumentaram, indicando combustão pobre. O carvão médio volátil foi o que menos provocou alterações na zona de combustão. Análises petrográficas mostraram que os finos de coque foram o principal componente da poeira, ou seja, que o carbono do char foi consumido. A injeção de carvão contribuiu direta e indiretamente para o aumento da geração de poeiras, diretamente devido às partículas de char com carbono residual e indiretamente pelo aumento da produção de finos de coque por abrasão e por enfraquecimento do coque causado pelo ataque das cinzas do carvão e da escória. No caso do carvão alto-volátil a rápida desvolatilização produziu um char com cenosferas infladas. O carvão médio volátil também gerou cenosferas de um intervalo de tamanho similar. Mas isto não ocorreu no caso do carvão baixo volátil, o que é explicado pelo fato de as partículas deste carvão relativamente inerte terem sido praticamente inalteradas durante a passagem através do sopro.

3.3.2.10 Instalação Piloto de Combustão de Carvão do CANMET Energy Technology Center

No Centro de Tecnologia da Energia do CANMET (*Canada Centre for Mineral and Energy Technology*) desde 1993 há uma planta piloto de combustão de carvão que simula as condições de operação de um alto-forno. A temperatura de sopro é de 900 °C, a velocidade é de 200 m/s, a velocidade de injeção do carvão é de 34 m/s e o tempo de residência é de 20 ms. Experimentos realizados neste equipamento por Hutny *et al.* (1996) mostraram que quanto maior o teor de matéria volátil e menor a granulometria de injeção, maior a eficiência de combustão. Além disso, quanto maior a distância de injeção, ou seja, quanto maior o tempo de residência, melhor o desempenho. Para carvões de alto *rank* o enriquecimento de oxigênio no sopro acelera a combustão. A reatividade ao CO₂ dos chars gerados é proporcional à razão H/C. Foi confirmado que o char é mais reativo do que o coque.

3.3.2.11 Câmara de Combustão do International Flame Research Foundation

Na Câmara de Combustão da IFRF – International Flame Research Foundation, na Holanda. Bortz (1983) simulou as condições operacionais de um alto-forno para o estudo da combustão de quatro tipos de carvões pulverizados e de um óleo. A desvolatilização foi considerada o fator determinante para o comportamento da combustão nos primeiros 10 ms. Partículas mais finas demonstraram pouco efeito no processo de desvolatilização. A principal vantagem de uma granulometria mais fina foi observada na região de combustão do char, onde uma distribuição de tamanho menor resultou em uma queima mais rápida. Carvões de alto *rank* tiveram menor combustibilidade, gerando mais fuligem.

3.3.2.12 Simulador de Combustão de Carvão da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Os primeiros experimentos de misturas de mais de dois carvões em um simulador da zona de combustão do alto-forno foram feitos por Assis *et al.* (2003). Misturas deste tipo apresentaram maiores taxas de combustão do que os carvões que as formavam. O pré-aquecimento de carvão a temperaturas abaixo da

temperatura de ignição promoveu um aumento da taxa de combustão. Os autores concluíram que podem ser atingidas taxas superiores a 200 kg/tgusa sem perda da permeabilidade com misturas de mais de dois carvões e pré-aquecimento dos mesmos.

Assis (2008) avaliou a queima de carvão vegetal em simulador da zona de combustão. Conforme esperado, a eficiência de combustão reduziu com o aumento da taxa de injeção. O aumento da granulometria do carvão pulverizado ocasionou um aumento de porosidade, porém isto não favoreceu a combustibilidade. O carvão vegetal também foi analisado via análise termogravimétrica visando traçar comparativos entre um elevado e um baixo gradiente térmico. Os resultados obtidos contrariaram aqueles empregando o simulador, o que evidencia que o este último, de condições similares às do alto-forno, é o equipamento ideal para estudar o índice de combustão de carvão vegetal em altos-fornos.

3.3.2.13 Simulador de Combustão de Carvão Pulverizado da Usiminas

Com o objetivo de avaliar a combustão de misturas de carvões de baixo e alto *ranks*, Reis (2003) realizou ensaios de combustão utilizando carvões de alto *rank* australiano e de baixo *rank* sul-africano, venezuelano e australiano. As variáveis de efeito mais significativo sobre a eficiência de combustão foram o *rank*, o tamanho da partícula e a taxa de injeção, além das interações do tamanho de partícula com a taxa de injeção, da temperatura do sopro com o enriquecimento de O₂ e da temperatura de sopro com a taxa de injeção. Foi verificado que o índice de combustibilidade das misturas é inversamente proporcional ao índice médio de *rank* das misturas. Contudo, a influência da composição maceral não foi definitivamente elucidada. Não foi observada nenhuma relação direta entre o índice de combustibilidade e a composição maceral dos carvões australianos e do carvão africano.

3.3.2.14 Simulador da Zona de Combustão da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN

Machado FS (2009) avaliou os ganhos ambientais e econômicos de misturas de finos de carvão vegetal com carvões brasileiros e importados. O trabalho foi

desenvolvido no simulador da zona de combustão da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Os carvões brasileiros foram provenientes de diferentes minas localizadas na região sul do país. As misturas binárias de carvão vegetal com carvão fóssil tiveram as proporções de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 % de carvão vegetal. A porosidade do carvão vegetal foi superior à dos carvões fósseis. Os carvões brasileiros excederam o limite de cinzas aceito para PCI. A eficiência de queima foi proporcional ao teor de carvão vegetal na mistura. A melhor mistura em relação aos aspectos técnicos e ambientais obtida foi a de 80% de carvão vegetal e 20% de CE4200 (carvão energético minerado pela Companhia Riograndense de Mineração – CRM), a qual, segundo o autor, permite uma redução nas emissões de carbono de 504 kg CO₂ / t gusa e ganhos de US\$ 2,06 por tonelada de ferro produzido.

3.4 CARVÃO BRASILEIRO

Impulsionado pelos altos preços do carvão no mercado internacional, o setor siderúrgico vem buscando novamente o carvão nacional como alternativa de suprimento. As principais jazidas carboníferas do país estão situadas na Bacia do Paraná, englobando os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. As reservas medidas na Bacia do Paraná representam aproximadamente 32 bilhões de toneladas, sendo que 89% destas localizam-se no estado do Rio Grande do Sul (KALKREUTH *et al.*, 2013).

Os carvões brasileiros são de baixa qualidade, principalmente em relação aos teores de cinzas e enxofre, que são maiores, e teores de matéria volátil, que são menores quando comparados a outros carvões produzidos no mundo. O teor de enxofre é mais elevado no Paraná, descendo para o sul. Carvão com característica metalúrgica é encontrado em Santa Catarina, porém com teor de cinzas muito acima dos carvões internacionais (REDIVO, 2002).

Devido aos processos diferenciados na deposição e na intensidade dos efeitos geológicos durante sua formação, a qualidade dos carvões brasileiros aumenta do sul do Rio Grande do Sul para o norte do país. Como característica geral, os carvões da Região Sul são carvões de baixo grau de carbonificação (*rank*), denominados comercialmente como alto-voláteis, com um elevado teor de cinzas (cerca de 50%) e teor variável de enxofre. O carvão bruto (ROM) do Rio Grande do

Sul possui em torno de 1% de enxofre, enquanto que o de Santa Catarina cerca de 4% e no Paraná 7%. O beneficiamento de carvões tem por objetivo reduzir o teor de matéria inorgânica e de enxofre. A matéria mineral disseminada na matéria orgânica torna o beneficiamento difícil e com baixo rendimento, com exceção do carvão do Paraná que apresenta um melhor rendimento (OSÓRIO *et al.*, 2008).

A principal utilização para o carvão minerado no Rio Grande do Sul é a combustão para geração de energia elétrica. Devido ao baixo rank, propriedades não coqueificantes e à alta reatividade, os carvões do sul do Brasil poderiam ser empregados para injeção em altos-fornos de modo a reduzir a dependência dos carvões importados de alto custo. Há vários estudos que mostram que o carvão do Rio Grande do Sul tem potencial para ser injetado nas ventaneiras dos altos-fornos em misturas com carvões importados (GOMES *et al.*, 2003; OSÓRIO *et al.*, 2004 e 2006; KALKREUTH *et al.*, 2005; GHIGGI, OSÓRIO e VILELA, 2006; GOMES *et al.*, 2006; MACHADO, *et al.*, 2008; MACHADO FS, 2009; MACHADO, 2009; MACHADO *et al.*, 2010; BARBIERI, OSÓRIO E VILELA, 2016).

Contudo, o alto teor de matéria mineral e enxofre do carvão brasileiro constituem um dos principais problemas que podem impedir a utilização desses carvões para PCI. Devido a estas restrições, um modo de utilização seria em misturas com carvões importados já utilizados para injeção (GOMES *et al.*, 2006). O carvão da jazida do Leão apresenta grau de liberação da matéria orgânica suficiente para a geração de concentrados da ordem de 15-20% de teor de cinzas, com recuperações mássicas suficientes para viabilizar a abertura de novas minas. Estes carvões podem ser utilizados como carvões para injeção em altos-fornos. Os teores de enxofre total, dos concentrados esperados, seriam da ordem de 1% (OSÓRIO *et al.*, 2008).

Carvões brasileiros subetuminosos da Mina do Recreio (RS) foram avaliados quanto à combustão em DTF e quanto à reatividade em termobalança. (KALKREUTH *et al.*, 2005). Os carvões sofreram beneficiamento em escala laboratorial. O beneficiamento reduziu significativamente o teor de cinzas e enxofre, embora em geral não tenha tido qualquer efeito sobre a reatividade dos chars ao CO₂. Os teores de álcalis e fósforo foram fracamente afetados pelo beneficiamento, porém todas as amostras ficaram dentro dos teores aceitáveis para PCI. O carvão

da Mina do Recreio poderia ser utilizado em misturas com carvões importados, de baixo teor de cinzas, de modo a compensar o alto teor de cinzas desse carvão.

Um estudo de misturas de carvão da Mina do Faxinal (RS) com coque de petróleo direcionado para PCI foi realizado por Ghiggi *et al.* (2006). O coque de petróleo apresenta baixíssimo teor de cinzas, se mostrando adequado para compor misturas com o carvão brasileiro, rico em cinzas. Outra vantagem é que o coque de petróleo tem baixo teor de enxofre. O aumento na proporção de coque de petróleo reduziu a combustibilidade da mistura e a reatividade dos chars ao CO₂. Os componentes da mistura queimaram de forma independente, fato comum na queima de misturas de carvões de reatividades muito diferentes. Em trabalho posterior (GHIGGI *et al.*, 2007) foi feita a combustão das mesmas amostras e de misturas com carvão alto volátil em termobalança e os ensaios foram interrompidos a 50% de conversão. As partículas de carvão aumentaram regularmente sua refletância durante o aquecimento, independentemente da refletância dos carvões originais e das características dos combustíveis misturados. A combustão das partículas seguiu o modelo do núcleo não reagido, ou seja, a reação iniciou na superfície da partícula e se moveu em direção ao centro, deixando uma camada de cinzas para trás conforme a frente de reação avançou.

Osório *et al.* (2006) avaliaram a reatividade ao CO₂ de misturas binárias de carvão da Mina do Faxinal (RS) e importados para PCI. A reatividade do carvão brasileiro foi o dobro da reatividade dos carvões importados. O carvão Faxinal mostrou-se rico em vitrinita de baixa refletância, enquanto os carvões importados foram ricos em inertinita. A reatividade das misturas foi proporcional ao teor de carvão Faxinal adicionado. Misturas até o limite de 50% de carvão Faxinal atenderam aos parâmetros requeridos para injeção. Análises petrográficas dos chars revelaram que o carvão Faxinal produziu preferencialmente char altamente isotrópico, muito reativo, enquanto os carvões importados geraram chars anisotrópicos, pouco reativos.

Uma pesquisa com carvão beneficiado da Mina do Butiá Leste (RS) e dois carvões australianos típicos de PCI foi desenvolvida por Pohlmann *et al.* (2011). Chars foram produzidos em DTF a 1300 °C e o fator mais relevante para a combustibilidade foi o teor de oxigênio na atmosfera na qual o char foi gerado. O

carvão brasileiro gerou chars de estruturas mais desordenadas, essencialmente isotrópicas, com maiores áreas superficiais, ao passo que os carvões importados, de maior *rank*, geraram chars com domínios anisotrópicos e áreas superficiais muito menores. A combustibilidade do carvão brasileiro foi maior frente aos importados e ainda poderia ser favorecida pela mudança da atmosfera convencional (O_2/N_2) para a de oxidação (O_2/CO_2), onde o N_2 do ar é substituído por CO_2 para que CO_2 e H_2O sejam os principais gases da combustão. Houve um aumento da área superficial de mesoporos conforme com o progresso da combustão, o que foi atribuído à coalescência e alargamento de microporos, o que acabou por aumentar a área dos mesoporos.

Kalkreuth *et al.* (2013) realizaram um estudo focado na petrografia das camadas superior, Banco Louco e inferior da Jazida de Candiota (RS). Em geral foi observado um predomínio de macerais do grupo da vitrinite, seguido pelos da inertinite e, por último, pelos da liptinite. Algumas camadas, em especial a Banco Louco, apresentam altos teores de inertinite. A matéria mineral revelou ser composta de argilominerais seguidos de quartzo e pirita. Ensaios de combustão em termobalança mostraram que há diferenças de combustibilidade entre as camadas estudadas, sendo que as diferenças encontradas parecem estar mais relacionadas à composição maceral do que ao *rank*. As camadas investigadas apresentariam potencial para utilização na geração de energia elétrica.

4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR DE PCI

4.1 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

No projeto do simulador do LASID-UFRGS, considerou-se como premissa a sua adequação para pesquisas em laboratório das condições de combustão que se aproximem das que ocorrem na injeção nas ventaneiras dos altos-fornos. Para tanto, deveria ter operação fácil, de baixo custo, com grau elevado de automação, possibilidade de variação e controle dos parâmetros operacionais, eficiente aquisição de dados, coleta dos produtos sólidos e gasosos da combustão para análise posterior, configuração vertical, injeção em pulso único do combustível sólido, porém com potencial de conversão futura para injeção contínua de combustíveis sólidos e gasosos (Machado et al., 2013; Rech et al., 2014). Iniciado em 2012, o projeto está sendo executado de acordo com as etapas a seguir descritas.

4.1.1 Etapas Executadas

A seguir, são listadas as diversas etapas já executadas desde o início do projeto até a elaboração desta tese:

- Revisão bibliográfica sobre os fenômenos envolvidos e sobre os parâmetros relevantes na combustão de finos de carvão sob as condições prevalentes na zona de combustão do alto-forno.
- Estudo sobre o estado da arte da injeção de combustíveis sólidos através de simuladores da zona de combustão do alto-forno.
- Realização de visitas técnicas a simuladores em operação.
- Definição do projeto conceitual de um simulador adequado a pesquisas acadêmicas de combustão em escala de laboratório, que simule o processo e as condições de injeção em altos-fornos.
- Projeto executivo e construção do simulador, definição e aquisição dos equipamentos auxiliares e instrumentação: fornos, termopares, medidores de pressão, controladores, analisador de gases, sistema de mistura e controle de gases e estruturas de suporte.

-
- Montagem mecânica e testes pré-operacionais dos equipamentos: fornos, bombas, instrumentação.
 - Estabelecimento das rotinas operacionais automatizadas programáveis de controle e aquisição de dados para diferentes etapas e opções de testes.
 - Realização dos testes iniciais de validação do simulador com carvões pulverizados e o estabelecimento dos protocolos de operação.
 - Projeto e instalação do sistema de acoplamento da filmadora de alta velocidade, instalação da filmadora e realização de ensaios de combustão com filmagem.
 - Redimensionamento do sistema de injeção, com modificação na lança de injeção, troca das válvulas de gatilho e aumento de capacidade volumétrica do pulso de alta pressão.
 - Redimensionamento do sistema de pré-aquecimento dos gases oxidantes com adição de mufla e fita resistiva de aquecimento térmico entre o forno Jung e o reator de combustão.
 - Revisão e otimização das rotinas operacionais.
 - Realização de testes exploratórios de combustão variando parâmetros operacionais: pressões das duas zonas, temperaturas dos fornos, massa e granulometria das amostras de carvão, intervalos de tempo de abertura e fechamento de válvulas, visando a definição de um ensaio padronizado de combustibilidade no simulador do LASID, com boa precisão e repetibilidade, que permita estudos comparativos entre combustíveis sólidos.

4.1.2 Etapas em Andamento

Além das etapas citadas acima, as seguintes etapas do projeto encontram-se em andamento:

- Realização de estudos de combustibilidade para uso em PCI com carvões minerais nacionais beneficiados e importados, carvões vegetais e coque de petróleo.
- Otimização do procedimento de coleta de gases de combustão e dos procedimentos analíticos de composição dos gases de combustão e de *burnout* dos resíduos sólidos pós-combustão.

- Consolidação do ensaio padronizado de avaliação de combustibilidade no simulador de PCI.

4.1.3 Etapas Futuras Previstas

Na continuidade do desenvolvimento do simulador, pretende-se ainda realizar:

- Realização de estudos de combustibilidade com misturas de carvões minerais nacionais beneficiados com carvões importados e com misturas de carvões minerais com outros combustíveis e biocombustíveis.

- Realização de estudos de investigação das variáveis termodinâmicas e da evolução das etapas do processo em função das temperaturas e pressões de operação, da natureza e granulometria dos combustíveis e da composição dos gases oxidantes, buscando obter dados relevantes para um entendimento mais aprofundado e para a modelagem dos fenômenos envolvidos no processo PCI.

- Determinação do perfil térmico estático do reator de combustão a vazio, sob pressão e temperatura de ensaio, bem como determinação instantânea da variação do perfil térmico durante o intervalo de tempo de injeção, sem combustão e com combustão.

- Realização de ensaios de combustão com filmagem concatenada com registro de variação de pressão e temperatura para determinação de tempos e características de reação com diferentes carvões

- Elaboração dos projetos conceitual e construtivo de adequação do simulador para os modos de operação com injeção contínua de gases combustíveis ou com injeção de combustíveis sólidos pulverizados, porém sem desabilitá-lo para a operação no modo pulso único.

4.2 PROJETO CONCEITUAL

4.2.1 Bases do Projeto

Tomou-se por base conceitual do projeto do simulador do LASID, o equipamento existente no IEHK/RWTH, Alemanha, cujo esquema é visto na Figura 4, por ser de operação simples, com custo operacional baixo, compatível com a

disponibilidade típica de recursos humanos e financeiros dos projetos acadêmicos. O equipamento desenvolvido em Aachen também serviu de base para a construção dos outros simuladores existentes no Brasil, na Usiminas, na Companhia Siderúrgica Nacional e na Universidade de Ouro Preto. Conforme indicado no esquema da Figura 4, ele simula a injeção dos combustíveis sólidos desde a ventaneira até a zona de combustão do alto-forno e apresenta as mesmas áreas representativas destas regiões do alto-forno.

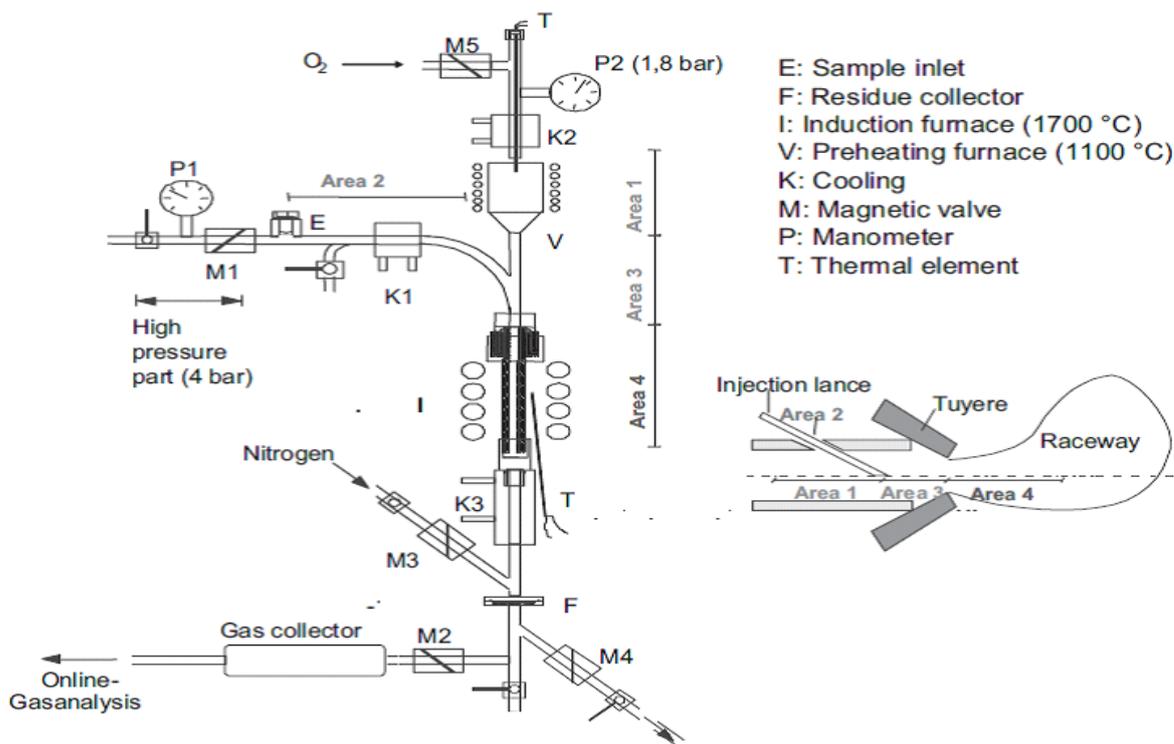


Figura 4: Diagrama Esquemático do Simulador de PCI do Instituto de Siderurgia da Universidade de Aachen - IEHK/RWTH, Alemanha

Fonte: MACHADO *et al.*, 2009)

Adicionalmente, o projeto do simulador buscou atender às premissas listadas nos objetivos (Capítulo 2) com destaque às seguintes:

- Adequação à realização de estudos acadêmicos que permitem a variação de parâmetros operacionais como natureza e granulometria dos carvões, temperatura de pré-aquecimento do ar e de combustão, pressão de operação, massa de

combustível injetado, volume e composição da mistura oxidante, tempo de residência na zona de combustão.

- Possibilidade de coleta representativa dos produtos gasosos e sólidos da combustão.

Como características inovadoras, o projeto buscou ainda:

- Capacidade de medição e registro das variações de temperatura e pressão ao longo do tempo curto de combustão, que dura poucos centésimos de segundo.

- Controle automatizado e flexível, com programação dos diversos parâmetros de operação, e com rotinas operacionais para diferentes tipos de ensaios.

- Concepção para operação inicial em regime descontínuo, com injeção discreta e instantânea do combustível a ser estudado, porém com a possibilidade de conversão futura para operação em regime contínuo, tanto para injeção de combustíveis gasosos como de combustíveis sólidos pulverizados.

4.2.2 Descrição do Projeto

O equipamento foi projetado com três regiões que operam com pressões distintas: a) pressão baixa; b) pressão alta; c) coleta de gases (BARBIERI *et al*, 2017).

A região de pressão baixa, que opera entre 200 e 300 kPa, é a região principal do simulador onde ocorre o processo de combustão propriamente dito. Nela é introduzida a amostra de carvão pulverizado e são pré-aquecidos os gases oxidantes. Durante o pulso de injeção do carvão, se dá o contato entre o fluxo de carvão pulverizado com o fluxo de gases oxidantes pré-aquecidos, ocorrendo o processo de aquecimento, pirólise e combustão do carvão, seguido da coleta, resfriamento e inertização dos resíduos sólidos da combustão.

A região de pressão alta, responsável pelo pulso de injeção, é um reservatório do gás oxidante frio, que opera entre 400 e 500 kPa. Ela está conectada com a região de baixa pressão por uma válvula de abertura rápida. Ao se abrir instantaneamente esta válvula de separação entre as zonas, origina-se um pulso gasoso que arrasta o combustível sólido pulverizado previamente depositado na zona fria da região de baixa pressão, levando-o até a zona de mistura com os gases oxidantes pré-aquecidos.

A região de coleta de gases é um reservatório do gás oxidante frio que recebe os gases resultantes da combustão, operando sob vácuo parcial, entre 10 e 50 kPa absolutos. Ela se conecta à zona de baixa pressão pós-combustão, logo após o filtro de coleta e inertização dos sólidos por uma válvula de abertura rápida. Por ocasião do pulso de combustão, abre-se a válvula, admitindo os gases limpos de combustão no reservatório de coleta para posterior amostragem e análise

O equipamento foi desenhado com o forno de pré-aquecimento dos gases posicionado horizontalmente e do forno de combustão posicionado verticalmente. Este arranjo permite avaliar com mais eficiência o perfil térmico das temperaturas dentro do forno de combustão e ao longo do eixo de combustão, onde ocorrem o aquecimento, a desvolatilização e a combustão do material injetado. Esta configuração também permite a leitura contínua da temperatura no ponto de mistura das partículas de combustível sólido com o gás oxidante pré-aquecido, bem como o acoplamento de uma filmadora de alta velocidade para registro das imagens da zona de combustão durante os testes.

Futuramente, para conversão do equipamento para operação contínua, serão desenvolvidos sistemas de injeção contínua de sólidos pulverizados em sistema de contrapressão, sistemas de amostragem de gases em linha, sistema de coleta de sólidos (char) em linha, com interrupção da reação por refrigeração e inertização instantâneas das amostras coletadas, bem como a alimentação das misturas gasosas pré-aquecidas por combustão.

A versão atual do fluxograma de processo do simulador de PCI do LASID-UFRGS para injeção em pulso do carvão pode ser vista na Figura 5. As regiões de pulso (alta pressão), de baixa pressão e de coleta de gases estão assinaladas, assim como os sistemas auxiliares de suprimento de gases e o circuito de refrigeração.

Para a fabricação das partes não submetidas a temperaturas elevadas, como os reservatórios de gás oxidante na zona de alta pressão, do reservatório de gases de combustão e dos cascos externos dos trocadores de calor foi selecionado o aço inoxidável 304 com teores médios de cromo e níquel.

4.3.2 Equipamentos

O simulador foi projetado e construído pela equipe de projeto do LASID. Os trabalhos de usinagem e solda foram executados por duas empresas especializadas de pequeno porte, SEMANT e PRECISA, ambas localizadas em Esteio/RS. Os equipamentos auxiliares foram selecionados e adquiridos de fabricantes especializados, dentro das especificações estabelecidas pela equipe de projeto.

Conforme descrito na seção 4.2.2 e visto na Figura 5, o simulador é composto por três regiões que operam em condições distintas de temperatura e pressão: a região de pressão alta que promove o pulso de injeção, a região de pressão baixa onde ocorre o processo de combustão propriamente dito, ou seja, a alimentação do carvão, o pré-aquecimento dos gases oxidantes, a mistura do carvão com os gases, o aquecimento, pirólise e combustão do carvão, bem como a coleta, refrigeração e inertização dos sólidos residuais, e a região sob vácuo parcial, de coleta dos gases. Os detalhes construtivos das diferentes zonas dentro dessas regiões são apresentados a seguir. A Figura 6 apresenta uma vista do simulador.

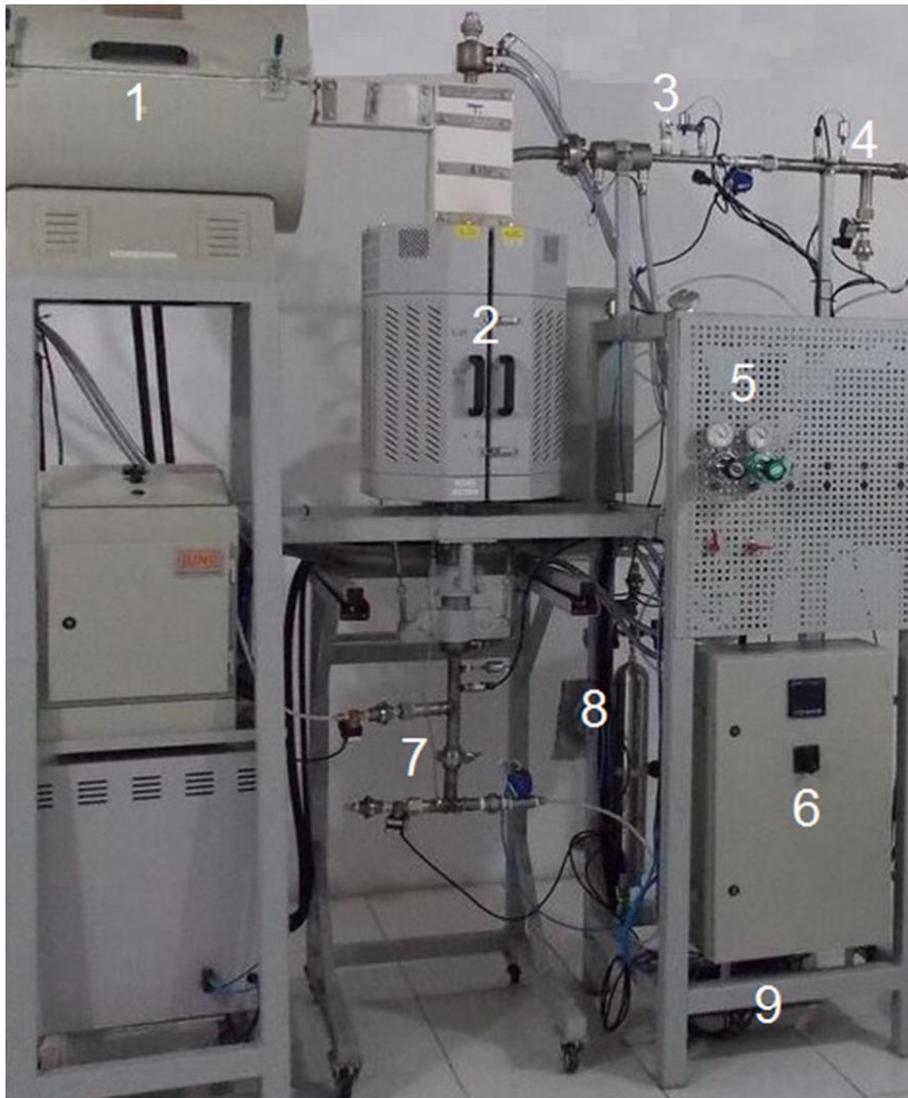


Figura 6. Simulador de combustão do LASID/UFRGS. Visão geral e principal módulos: 1 – forno de pré-aquecimento, 2 – forno de combustão, 3 – sistema de alimentação, 4 – pulso, 5 – painel de gases, 6 – central de controle e medição, 7 – filtro coletor de char, 8 – cilindro coletor de gases, 9 – sistema de vácuo e refrigeração.

Fonte: MACHADO, 2017.

4.3.2.1 Zona de Alta Pressão - ZAP

A zona de alta pressão ou zona de pulso consiste principalmente num reservatório de gás em pressão elevada e temperatura ambiente responsável pelo pulso de injeção do carvão pulverizado, conforme se vê na Figura 7. O pulso ocorre pela abertura rápida da válvula de diafragma VSD65 de alta vazão, abertura de 1/2",

acionado por solenoide, no intervalo de tempo programado na rotina específica que comanda o ensaio experimental.

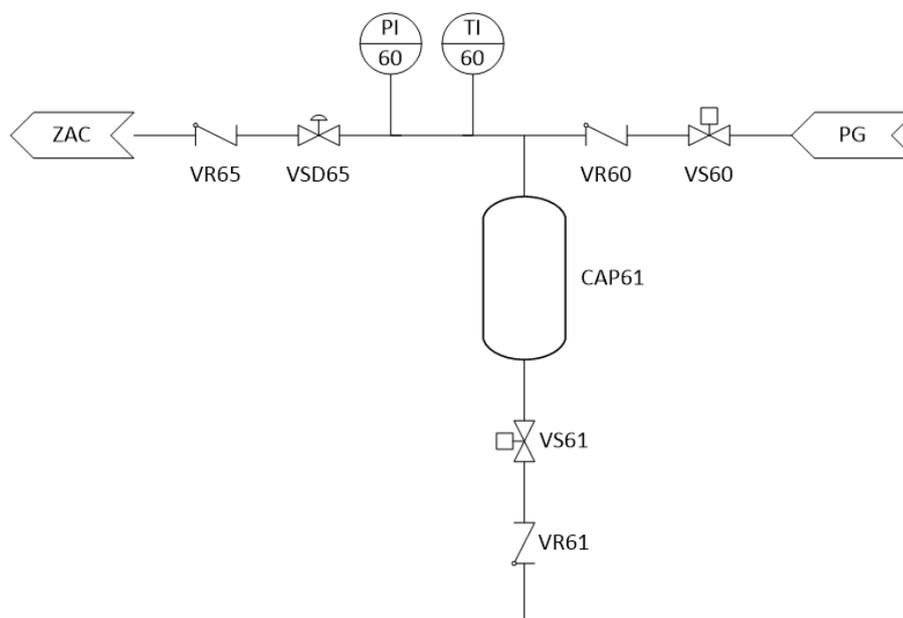


Figura 7. Fluxograma da zona de alta pressão - ZAP

O gás é alimentado no reservatório através de uma válvula agulha VS60 *on-off*, controlada por um Controlador Lógico Programável (CLP), assim como uma válvula agulha *on-off* VS65 que permite a saída do gás para ajuste da pressão do gás no reservatório. As três válvulas VSD65, VS60 e VS61 têm fluxo unidirecional, da pressão elevada para a baixa, e por isso são protegidas respectivamente por válvulas de retenção (VR65, VR60, VR61) que evitam o retorno de gases em momentos de sobrepressão na sua saída e que ocorrem em algumas etapas das rotinas operacionais.

O reservatório de gás com volume de 330 mL foi fabricado em aço inox SS304. As tubulações de 1" sch40 em aço inox adicionam mais 270 mL de volume de armazenagem de gás, totalizando uma capacidade total de 600 mL para esta zona. Todo o sistema é projetado para resistir a pressões de até 10 bar (1 Mpa)

Os sensores de pressão PI60 e de temperatura TI60 enviam continuamente os valores respectivos ao sistema de registro e controle durante os ensaios. A pressão desta zona é ajustada durante o ensaio a partir do sinal do PI60. Os valores

de pressão do PI60 são também enviados ao sistema de aquisição rápida de dados a cada 3 ms e permitem acompanhar o pulso de injeção durante o ensaio.

4.3.2.2 Zona de Alimentação de Carvão - ZAC

A zona de alimentação do carvão, apresentada na Figura 8, consiste numa tubulação horizontal de $\frac{1}{2}$ sch40 de aço 310 com uma ramificação vertical, onde está a válvula VA65, de abertura plena manual. Durante o ensaio, dentro da programação da rotina, a válvula é aberta manualmente pelo operador para introduzir a amostra de carvão até a tubulação principal.

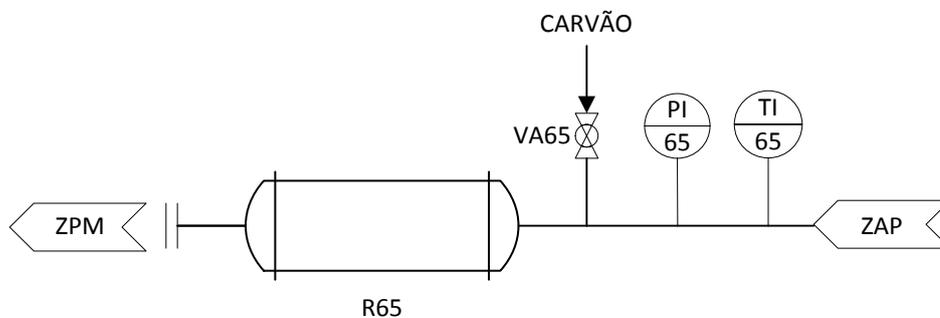


Figura 8. Fluxograma da zona de alimentação do carvão - ZAC

Nesta zona, o gás oxidante está na pressão baixa, de realização do ensaio, e na temperatura ambiente. A pressão desta zona é controlada através do sistema de válvulas na entrada da zona de pré-aquecimento e mistura, com quem está interligada (ver seção 4.3.2.3). Um resfriador R65 de camisa d'água na saída da tubulação impede o aquecimento das paredes, prevenindo o risco de aumento da temperatura via condução de calor pelas paredes de aço na seção da tubulação onde está depositado o carvão pulverizado antes da injeção. Evita-se assim um processo prematuro de secagem e aquecimento da amostra. Pelo desenho horizontal, não há transferência de calor convectiva do gás quente existente na zona posterior de mistura do carvão com os gases oxidantes pré-aquecidos; a transferência de calor por condução gasosa num sistema de gás estagnado é mínima e pode ser negligenciada.

Como ocorre na zona anterior de alta pressão, os sensores de pressão PI65 e de temperatura TI65 enviam continuamente os valores respectivos ao sistema de registro e controle durante os ensaios. Os valores de pressão do PI65 são também enviados ao sistema de aquisição rápida de dados a cada 3 ms e permitem acompanhar o pulso de injeção durante o ensaio, permitindo o registro da diferença de pressão entre as zonas durante o processo de injeção e combustão do carvão. Os valores da temperatura do TI65 são enviados ao sistema de registro e controle; se acima do valor limite programado, o sistema de circulação de água dos resfriadores é acionado automaticamente.

Esta seção da tubulação foi construída inicialmente com tubulação de 1" sch40. Nos testes pré-operacionais iniciais, a eficiência do pulso de injeção foi insatisfatória no que se referia ao arraste do carvão pulverizado. A seção foi redimensionada e foi fabricada com tubulação de 1/2" sch40. Novos testes mostraram um ganho de eficiência neste aspecto.

4.3.2.3 Zona de Pré-Aquecimento e Mistura - ZPM

Nesta zona, vista na Figura 9, o pré-aquecimento dos gases oxidantes ocorre numa tubulação horizontal de aço 310 de 2" sch40, com 900 mm de comprimento, aquecida pelo forno Jung, visto na Figura 6, cujas características estão descritas mais adiante (ver seção 4.3.2.7). Desde a substituição do tubo original de pré-aquecimento de 1" com 600 mm de comprimento pelo tubo atual de 2" e 1000 mm, após o forno Jung está instalada uma mufla de aquecimento com 30 cm de comprimento, fornecida pela empresa Fornos Sanchis, de Porto Alegre. Por simplicidade, o conjunto forno Jung + mufla Sanchis está representado no fluxograma como um forno único F55.

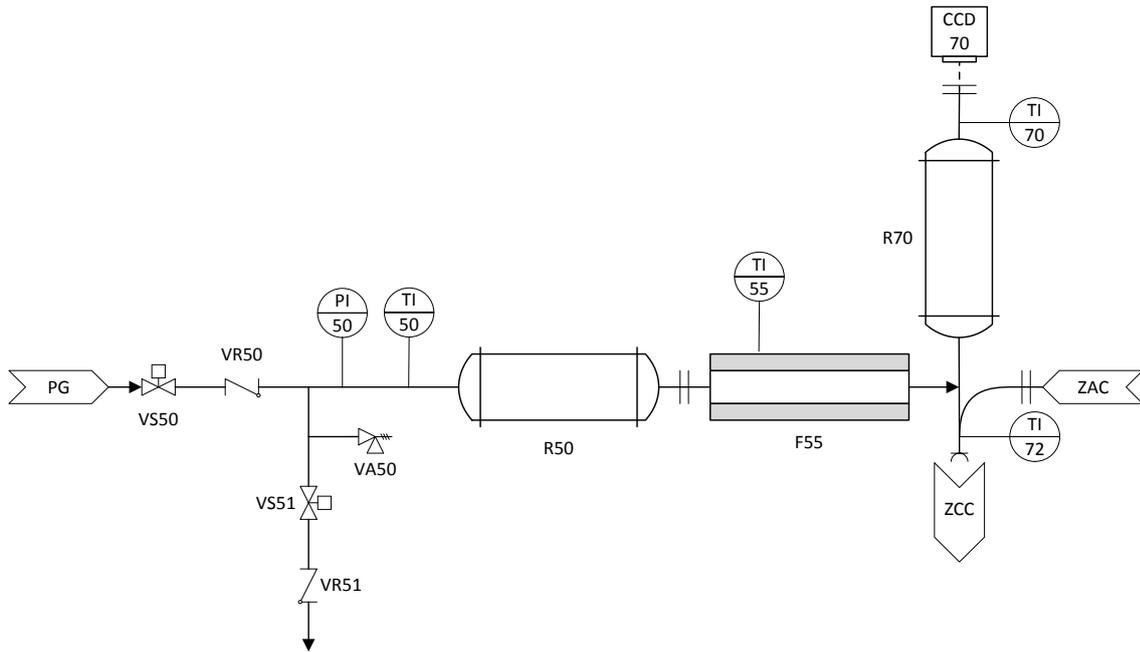


Figura 9: Fluxograma da zona de pré-aquecimento e mistura – ZPM.

Anterior à tubulação de 2", tem-se a seção de admissão dos gases oxidantes, construída em tubulação de aço 310 de 1" sch40, com as válvulas e instrumentos de medição e controle do fluxo de gases. Após a seção de 2", o fluxo de gases pré-aquecidos escoam até uma tubulação vertical de aço 310 de 1" sch40 e fluem verticalmente até a zona de mistura com o carvão pulverizado injetado. O fluxo de gás frio arrastando o carvão pulverizado proveniente da zona de alimentação do carvão chega ao ponto de mistura através de uma tubulação de aço 310 de 1" sch40 fabricada em curva suave de 90°. Este formato foi escolhido para evitar um choque do carvão arrastado contra a parede vertical da tubulação dos gases pré-aquecidos, convertendo gradativamente a direção do fluxo de carvão de horizontal para vertical. Promove-se assim uma mistura mais eficiente e homogênea do carvão arrastado com o fluxo gasoso vertical de gases oxidantes pré-aquecidos. A partir do instante da mistura, o carvão é arrastado para a zona de combustão, já iniciando o processo de secagem e pré-aquecimento antes de chegar à zona de combustão.

Na rotina de ensaio, os gases oxidantes em temperatura ambiente são admitidos por uma válvula agulha VS50 *on-off*, controlada pelo CLP, assim como uma válvula agulha similar VS51 que permite a saída do gás para ajuste da pressão

do gás em toda a região de baixa pressão. As válvulas de retenção VR50 e VR51 protegem-nas contra momentos de sobrepressão, em arranjo similar ao adotado na zona de alta pressão (ver seção 4.3.2.1). Uma válvula de alívio VA50 protege toda a região de baixa pressão contra acidentes por pressões mais elevadas do que as programadas em caso de falha em algum elemento do sistema de controle de pressão, pois o reator de alumina aquecido a 1400 °C pode romper-se em pressões maiores do que 5 bar (500 kPa). Sensores de pressão PI50 e de temperatura TI50 enviam os dados de pressão e temperatura ao sistema supervisório para registro e controle. O forno de pré-aquecimento é programado e controlado autonomamente ou via sistema supervisório, a partir dos dados enviados pelo seu sensor de temperatura TI55.

Na parte superior da tubulação vertical de 1", acima do ponto de mistura, há um bocal de acesso desenhado para permitir a inserção de termopares de medição da temperatura ou, alternativamente, o acoplamento de um visor transparente solidário a uma filmadora de alta velocidade CCD70, cujas características estão descritas na seção 4.3.2.7. Nos ensaios regulares, insere-se ali o termopar TI72 de indicação da temperatura do ponto de mistura do carvão com os gases oxidantes pré-aquecidos, cujos valores medidos a cada 3 ms são enviados ao sistema de aquisição rápida de dados, permitindo o registro do perfil de temperatura durante o intervalo de tempo desde o início do pulso de injeção até final da combustão de carvão. Em ensaios especiais de filmagem do teste de combustão, o sensor TI72 é removido e é acoplada a filmadora de alta velocidade, cujo acionamento é controlado pelo sistema supervisório do simulador, para que se possa associar as imagens aos perfis de temperatura registrados em testes similares com registro de temperatura;

Um resfriador R50, de camisa d'água, posicionado antes do forno de pré-aquecimento, protege os sensores e válvulas a montante de da tubulação impede o aquecimento das paredes, prevenindo dos riscos de mau funcionamento associados a um aumento da temperatura excessivo naquela região. O resfriador R70, localizado na tubulação vertical acima da região de fluxo dos gases pré-aquecidos, protege os sensores ou visores que estiverem instalados no bocal de acesso. A

ativação do circuito de refrigeração é controlada pelo sistema supervisor via CLP a partir dos valores enviados pelos sensores TI50 e TI70.

4.3.2.4 Zona de Combustão e Coleta de Char - ZCC

Na parte superior desta zona, apresentada na Figura 10, a combustão do carvão pulverizado se dá num reator tubular vertical de alumina de alta pureza, capaz de operar a até 1700 °C, de 730 mm de comprimento, com diâmetro externo de 25 mm e espessura de parede de 3 mm. O reator está inserido no forno vertical de combustão Carbolite, cujas características estão descritas na seção 4.3.2.7. Este forno possibilita a utilização de reatores com diâmetros externos de até 50 mm. O forno é controlado por um CLP cativo, com programas para definir patamares de temperatura e taxas de aquecimento, a partir dos dados de temperatura do forno fornecidos pelo termopar TI73.

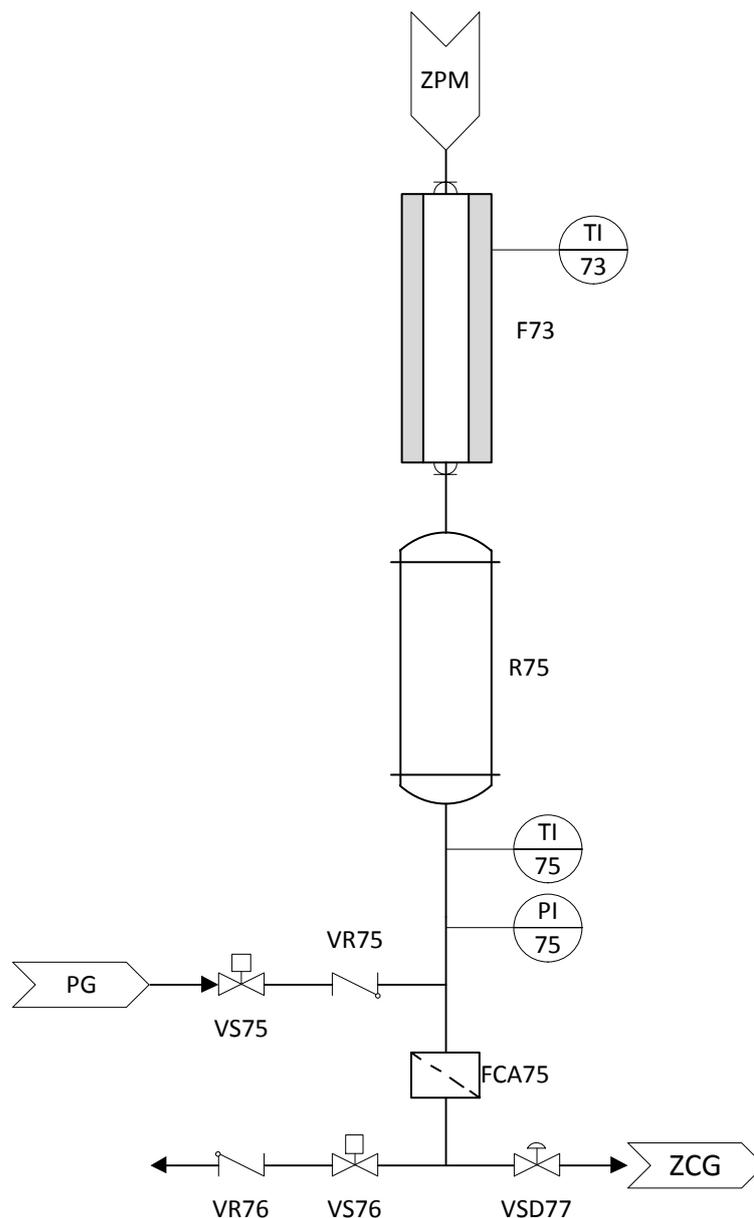


Figura 10: Fluxograma da zona de combustão e coleta do char – ZCC.

A entrada e saída do reator de alumina conectam-se às tubulações de aço 310 através de dois acoplamentos tronco-cônicos de aço 310, projetados para dar estanqueidade suficiente ao sistema nas condições de operação desta zona, de até 4 bar (400kPa). Um sistema de molas helicoidais e tensionadores ajustáveis pressiona o conjunto reator-acoplamentos para se obter a estanqueidade a frio na pressão de operação e para compensar dilatações que ocorram durante o aquecimento e manter a estanqueidade após o aquecimento do sistema.

Após a combustão, os gases de combustão resultantes com os sólidos particulados arrastados passam por um refrigerador R75 de camisa d'água e, a seguir, pelo coletor de amostras FCA75, que contém um filtro de bronze sinterizado para separação e coleta do char. Após a coleta do char, um fluxo de nitrogênio refrigera o char coletado no filtro e cria uma atmosfera gasosa não reativa no coletor de amostra. Após passarem pelo filtro, os gases de combustão fluem para a zona de coleta de gases através da válvula de diafragma VSD77 para o reservatório de coleta de gases.

O filtro de coleta do char é uma pastilha fabricada pela sinterização de microesferas de bronze, cuja porosidade é determinada pelo diâmetro destas esferas. São utilizados nos ensaios filtro com 45 mm de diâmetro, espessura de 3 mm e porosidade de 25 μm e 40 μm .

A etapa de refrigeração do char coletado no filtro ocorre através das válvulas VS75 e VS76 conforme os parâmetros de tempo e vazão selecionados na rotina operacional. Também estas válvulas são protegidas pelas válvulas de retenção VR75 e VR76 para evitar fluxos de retorno quando ocorrem pressões maiores a jusante. O sensor de pressão PI75 envia os dados medidos a cada 3 ms ao sistema de aquisição rápida de dados, permitindo a comparação a cada instante de duração do pulso de combustão das diferenças de pressão entre a início e o final da zona de baixa pressão, informação útil para avaliar-se o regime de escoamento dos gases durante o pulso. O sensor de temperatura TI75 envia os dados ao supervisor para registro e controle do acionamento automático do refrigerador R75.

A válvula de alívio VA50, mencionada na seção anterior, foi instalada após uma explosão acidental do reator de alumina por sobrepressão, acima de 5 bar (500kPa), causado por um mau funcionamento da válvula VSD65 de conexão com a zona de alta pressão (ver seção 4.3.2.1). Além da ruptura do reator, os fragmentos de alumina lançados danificaram as resistências de aquecimento do forno Carbolite, cuja reposição por novas peças importadas impactou significativamente o orçamento do projeto. Como medida preventiva, os testes pré-operacionais, cujos resultados são apresentados no capítulo 5, foram executados em sua maioria com um reator de aço 310 de 1" sch40 com as mesmas dimensões do reator de alumina, limitando-se por isso a temperatura do forno de combustão a 1000 °C.

Nos testes iniciais de comissionamento do simulador, verificou-se que o volume de gás pré-aquecido se mostrou insuficiente para manter o suprimento de gás durante o teste de combustão. Para corrigir essa deficiência, o diâmetro da tubulação da seção de pré-aquecimento foi alterado de 1” para 2” e seu comprimento foi aumentado para 90 cm; instalou-se ainda nesta seção uma mufla horizontal de 30 cm de comprimento fabricada pela empresa Fornos Sanchis, de Porto Alegre. Adicionalmente, a tubulação horizontal e vertical de 1” entre a saída da mufla e a entrada do reator de combustão foi revestida com uma fita térmica resistiva para aquecimento das paredes a temperaturas de até 650 °C.

Futuramente, quando houver nova disponibilidade financeira para se realizar modificações no simulador, o conjunto forno + mufla + fita de resistência térmica deverá ser substituído por um forno único de aquecimento e a seção de tubulação entre a saída do pré-aquecedor e entrada do reator, incluindo a seção de mistura das correntes gasosas, deverá ser redesenhada, tornando-a mais compacta e mais eficiente sob ponto de vista térmico e fluidodinâmico.

4.3.2.5 Zona de Coleta dos Gases de Combustão - ZCG

A zona de coleta dos gases de combustão, conforme se vê na Figura 11, consiste principalmente no cilindro CAG85 de aço inox SS304 com volume de 1 L para coletar uma amostra dos gases de combustão, operando sob vácuo e temperatura ambiente. O período de coleta é definido pela abertura e fechamento da válvula de diafragma VSD65 de alta vazão, abertura de 1/2”, acionado por solenoide, no intervalo de tempo programado na rotina específica que comanda o ensaio experimental.

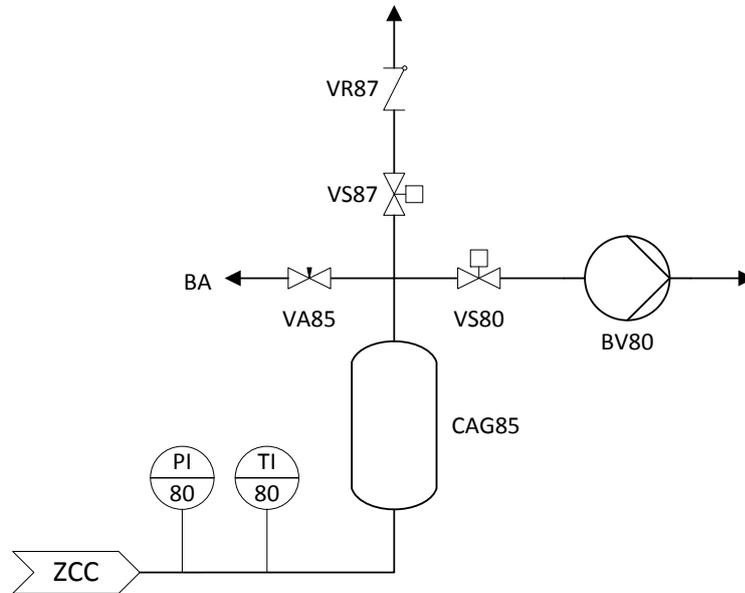


Figura 11: Fluxograma da zona de coleta dos gases de combustão – ZCG.

A bomba de vácuo (ver seção 4.3.2.6), conectada ao cilindro através da válvula de diafragma VSD80, promove a purga de todas as zonas do simulador, bem como o nível de vácuo, dentro dos valores de pressão e tempo definidos nas rotinas operacionais para cada ensaio. A depressurização rápida do cilindro ocorre através da abertura da válvula agulha VS87, também protegida por uma válvula de retenção para evitar o fluxo contrário do ar ambiental enquanto o cilindro está sob vácuo. A transferência de alíquotas da amostra coletada dos gases de combustão para posterior análise é feita pelo operador através da válvula VA85, com o uso de *bags* plásticos de amostragem (BA). Como a transferência dos gases do cilindro de coleta para o *bag* ocorre por diferença de pressão, já que o volume total de gases de combustão produzidos é função da massa e do teor de matéria volátil do carvão em teste e da eficiência de combustão, o nível de vácuo inicial no cilindro em cada ensaio deve ser ajustado para que a pressão final seja no mínimo 0,2 bar acima da pressão ambiente.

O sensor de pressão PI80 envia os dados ao supervisor para registro e controle das válvulas no ajuste da pressão do cilindro. O sensor de temperatura TI80 envia os dados para registro.

4.3.2.6 Sistemas de Vácuo e de Refrigeração

O sistema de purga e evacuação consiste numa bomba de vácuo, conectada a três pontos do equipamento: entrada da zona de alta pressão, entrada da zona de baixa pressão e saída do sistema de coleta de gases. Através da abertura programada das válvulas de entrada das zonas de alta e baixa pressão e de saída do cilindro de coleta de gases, a bomba realiza a purga rápida e completa do sistema para remoção de gases residuais após cada ensaio. Durante os ensaios, é também utilizada para o controle da pressão da zona de alimentação do carvão e da pressão do reservatório de coleta de gases antes do pulso de combustão.

O sistema de refrigeração é constituído por uma bomba centrífuga para bombeamento de água de em circuito fechado de um reservatório de 500 L até um distribuidor de ramificação de fluxo para os quatro resfriadores do simulador nas zonas de alimentação de carvão, de entrada dos gases oxidantes de saída dos gases de combustão e no topo do sistema de mistura do carvão com os gases oxidantes. O fluxo de saída dos resfriadores retorna ao reservatório de água. Os quatro circuitos de refrigeração têm a vazão controlada manualmente por rotâmetros. O sistema de refrigeração é acionado automaticamente se qualquer uma das temperaturas a serem controladas ultrapassar os valores programados.

4.3.2.7 Equipamentos adquiridos

Os principais equipamentos do simulador adquiridos de fabricantes externos são o forno de combustão, o forno de pré-aquecimento dos gases oxidantes, a bomba de vácuo para purga do sistema e a filmadora de alta velocidade.

O forno de combustão é um forno resistivo tubular vertical fornecido pela empresa Carbolite, de Hope Valley, Inglaterra. Tem 900 mm de comprimento e 60 mm de diâmetro interno. Sua potência térmica é de 4.500 W e pode operar a temperaturas de até 1700 °C. Permite utilizar reatores de alumina para combustão de 1" a 2" (25 a 50 mm). Opera atualmente com reator de 25 mm de diâmetro.

O forno de pré-aquecimento é um forno resistivo tubular horizontal fornecido pela empresa Fornos Jung, de Blumenau - SC, Brasil. Este forno também possui 900 mm de comprimento e 60 mm de diâmetro. Sua potência térmica é de 2.000 W

e pode operar a temperaturas de até 1200 °C. Opera atualmente com pré-aquecedor tubular de 50 mm de diâmetro.

A seleção dos fornos levou em consideração as dimensões do combustor e do pré-aquecedor, as temperaturas máximas de operação dos mesmos, bem como as rampas de aquecimento inicial da temperatura ambiente até a de operação, cujo tempo máximo foi definido em 90 min. Na foto do simulador apresentada na Figura 6, estão identificados os fornos Jung e Carbolite.

A bomba de vácuo selecionada é uma bomba modelo Z2NT, fabricada e fornecida pela empresa Vacuubrand, de Wertheim, Alemanha. É uma bomba de diafragma livre de óleo para promover o bombeamento e evacuação sem risco de contaminação. Possui alta capacidade de aspiração, podendo atingir pressões absolutas de 7 mbar (0,7 Pa).

A filmadora de alta velocidade modelo TS3L é fornecida pela empresa FASTEC, São José dos Campos – SP, Brasil. Sua resolução é função da velocidade de captação de imagens; na velocidade máxima de 1250 fps (quadros por segundo), a resolução é de 800 × 600 pixels. Ela pode ser utilizada para registrar as imagens da evolução da combustão ao longo de um ensaio de combustão, desde o ponto de encontro das partículas injetadas com os gases oxidantes pré-aquecidos até sua saída do reator de combustão.

4.3.3 Instrumentação e Controle

4.3.3.1 Central de Controle e Medição

A operação do simulador é controlada a partir de rotinas programáveis através de um controlador lógico programável (CLP) da marca NOVUS (Porto Alegre, Brasil). A aquisição de dados de temperatura e pressão medidos pelos sensores durante os ensaios experimentais é feita através de dois registradores de dados de campo fornecidos pela NOVUS - *field loggers* – que os enviam ao controlador. Um registrador faz a aquisição lenta, na base de segundos, dos dados das variáveis de controle, enquanto o outro faz a aquisição rápida, na base de milissegundos, das variáveis de ensaio. O controlador e os dois registradores se comunicam com um sistema supervisor da marca ELIPSE (Porto Alegre, Brasil).

Este sistema comanda o simulador através do controlador e armazena os dados de aquisição rápida e de aquisição lenta.

4.3.3.2 Painel de Gases

O painel de gases, responsável pelo controle das pressões e vazões dos gases utilizados nos ensaios, é constituído por duas linhas de gases, cada uma delas com uma válvula reguladora de pressão seguida por um controlador de fluxo mássico da marca OMEGA (Campinas-SP, Brasil). As válvulas de controle de pressão são ajustadas manualmente na pressão máxima de alimentação do sistema enquanto os controladores de fluxo mássico controlam as vazões dos gases através das rotinas programadas, com valores ajustados de 0 a 100 L/s. Nos ensaios pré-operacionais de combustão, foram utilizados o oxigênio como gás comburente e o nitrogênio como gás para resfriamento e inertização do char nos testes de combustão.

4.3.3.3 Instrumentos

O equipamento é dotado de um conjunto sensores de pressão (PI) e de temperatura (TI), que enviam dados ao sistema de supervisão e controle, tanto para controle dos parâmetros de entrada e para o acionamento das válvulas, bomba de vácuo e sistema de refrigeração como para registro dos dados de evolução do ensaio através dos sistemas de aquisição ultrarrápida e de aquisição rápida de dados,

Os sensores de pressão são sensores rápidos com tempo de resposta inferior a 1 ms. Assim, através dos dados dos sensores PI60 (zona de alta pressão), PI65 (início da zona de baixa pressão) e PI75 (final da zona de baixa pressão) enviados ao sistema de aquisição, tem-se informações precisas instantâneas dos valores da pressão dos gases. Com isso, espera-se poder avaliar os fluxos e velocidades dos gases nas zonas de arrastamento dos gases e de combustão do carvão durante o processo de injeção e combustão do carvão.

Uma série de válvulas automatizadas de controle (VS, VSD) permite um controle preciso dos intervalos de tempos programados nas rotinas operacionais dos

diferentes tipos de testes. Foram utilizadas válvulas de alto desempenho, com tempo de resposta inferior a 5 ms.

Os sensores de temperatura utilizados nos testes pré-operacionais são termopares nacionais tipo K (Cromel-Alumel) que operam a temperaturas de até 1260 °C. Na posição IT72, nos ensaios regulares de combustão, usa-se um termopar tipo K de ponta exposta, para informação mais precisa e rápida das variações de temperatura da região de mistura do carvão durante o ensaio

Para a medida de temperaturas em faixas mais elevadas, adquiriu-se ainda um conjunto de termopares japoneses, ultrarrápidos, para avaliação dos perfis de temperatura na zona de combustão, em ensaios especiais sem e com combustão de carvão, a serem utilizados na posição IT72, porém posicionados dentro da zona de combustão. São termopares longos, com 1200 mm de comprimento, do tipo B (Pt-Rh) e tipo C (W-Re), que podem operar em temperaturas de até 1820 e 2200 °C, respectivamente. Os elementos metálicos são montados com miçangas cerâmicas isolantes dentro de um tubo capilar que, na ponta exposta soldada de medição, tem um diâmetro de apenas 40 μm . Por esta construção especial, possuem uma constante de tempo τ inferior a 1 ms, característica importante para se ter uma medição rápida e precisa da evolução da temperatura da combustão durante o pulso.

A Figura 12 apresenta uma vista do laboratório de simulação de PCI do LASID, com o simulador situado à esquerda e o console de programação e operação à direita.



Figura 12: Vista geral da sala do simulador do LASID.

5 PRÉ-OPERAÇÃO DO SIMULADOR DE PCI

5.1 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

Os ensaios com injeção de carvão em pulso conduzidos no simulador de PCI são realizados através de rotinas operacionais automatizadas programáveis para três tipos de testes:

- Combustão com oxigênio puro ou com ar;
- Combustão com misturas nitrogênio – oxigênio, de composição ajustável;
- Pirólise com nitrogênio.

Além destas, foram desenvolvidas rotinas auxiliares de verificação de estanqueidade, de operação dos fornos, de purga e de limpeza. Todas as rotinas são compostas por sub-rotinas que comandam os tempos de abertura e fechamento de válvulas, as vazões de gases utilizadas, as pressões das diferentes regiões do simulador, a aquisição de dados, os momentos de intervenção manual do operador para alimentação do carvão e para a coleta da amostra de gases de combustão entre outros. Os valores de pressões, temperaturas, vazões e tempos são programados pelo operador previamente à execução dos ensaios.

O sistema de aquisição de dados registra as informações de tempo, pressão e temperatura durante os ensaios de combustão ou pirólise. O sistema possui duas formas de aquisição, uma lenta, com intervalos de 1s, que coleta todos os dados do simulador, e uma rápida (ms), que coleta três pressões e uma temperatura. Os dados coletados na aquisição rápida são relevantes aos ensaios e mostram a evolução dessas variáveis durante a injeção e combustão da amostrada pulverizada. O modo de aquisição rápida é programado apenas para o intervalo de tempo da combustão propriamente dita e da coleta de gases, de cerca de 1000 ms, para evitar saturação rápida da memória de aquisição.

Detalhes sobre o desenvolvimento e operacionalidade todas as rotinas e respectivas sub-rotinas são apresentados na tese de doutorado de outro membro da equipe do simulador de PCI do LASID-UFRGS (MACHADO, 2017). Na Tabela 1 abaixo estão relacionadas as rotinas desenvolvidas.

Tabela 1: Rotinas do Simulador de PCI do LASID/UFRGS.

Rotina	Descrição	Caráter
R1	Escolha dos gases e condições de trabalho	Geral
R2A	Purga do painel de controle	
R2B	Purga dos gases do painel	
R3	Teste de pressurização a frio	
R4	Aquecimento dos fornos	
R5	Resfriamento dos fornos	
R6	Preparação do ensaio simulador	Preparatório
R7	Limpeza do Simulador	
R8	Ensaio de Pirólise (N ₂)	Pirólise
R9	<i>Shoot</i> (Pulso)	Execução
R10	Ensaio de combustão (O ₂ /ar industrial)	Combustão I
R11	Ensaio de combustão (N ₂ + O ₂)	Combustão II
R12	Ensaio de avaliação do perfil térmico	Temperatura

Fonte: MACHADO, 2017

O procedimento padrão de um ensaio de injeção de pulso ocorre com as seguintes etapas:

- Seleção do teste e programação da sua rotina própria com os valores dos parâmetros ajustáveis: temperaturas, pressões, vazões e intervalos de tempo;
 - Pressurização e verificação de estanqueidade do sistema;
 - Pré-aquecimento dos fornos;
 - Purga prévia com o gás do ensaio;
 - Evacuação do equipamento e do sistema de coleta de gases;
 - Pressurização parcial do equipamento;
 - Abertura e fechamento da válvula do amostrador;
 - Alimentação do combustível;
 - Pressurização completa do simulador;
 - Realização do ensaio propriamente dito;
 - Coleta dos gases e resfriamento e remoção do char;

- Análise dos gases;
- Análise do char

Na Figura 13 é apresentado um gráfico gerado pelo supervisor do simulador durante um teste sem amostra (tiro em vazio) para verificação da aquisição de dados. Em rosa tem-se a pressão na zona de alta pressão (pulso). Na região de baixa pressão há dois sensores para medição da pressão, um na zona próxima à zona de injeção (em vermelho) e outro na região próxima à zona de coleta do char (em verde). Em azul tem-se o registro de temperatura durante o ensaio. No momento do pulso a pressão da zona de alta pressão cai devido à liberação do gás enquanto a pressão da zona de baixa pressão vai aumentando, pois está recebendo o fluxo de gás. Ao final, as pressões se equalizam. No momento do encontro do gás frio com o fluxo do gás pré-aquecido, a temperatura apresenta uma queda devido à entrada de gás frio. Também se observam a diferença entre as pressões do PI65 no início da zona de transporte do carvão e do PI75 após a o reator, que indica a força motriz do fluxo de gás, o ponto de fechamento da válvula de entrada do gás vindo da zona de alta pressão quando a pressão do PI65 após a válvula começa a cair em relação a do PI60, localizada antes da válvula.

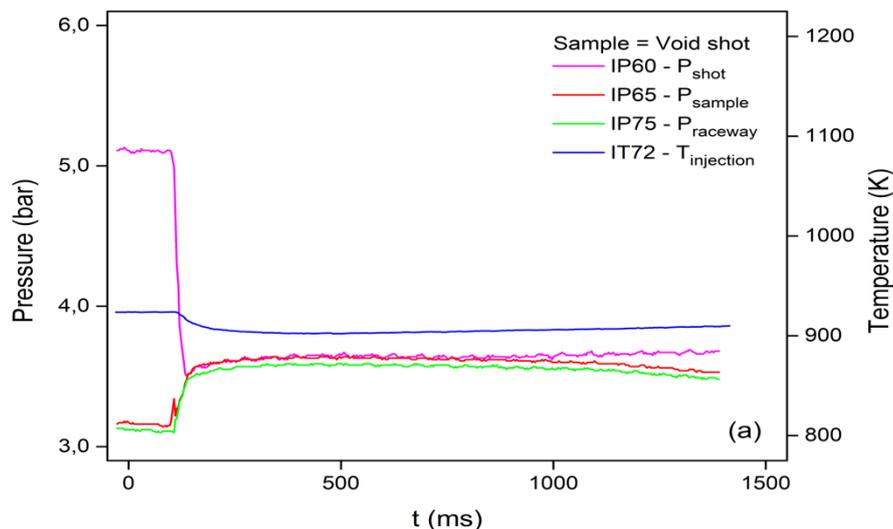


Figura 13: Gráfico de aquisição rápida da evolução de pressão e temperatura num tiro em vazio.

Fonte: MACHADO, 2017.

5.2 Testes Pré-Operacionais

Os testes pré-operacionais tiveram como objetivos desenvolver a metodologia dos ensaios de combustão, buscar definir ensaios padronizados para avaliação da combustibilidade de diferentes combustíveis, demonstrar a capacidade do simulador de operar com diferentes condições de pressão e temperatura e com diferentes massas de amostra injetada, fornecendo resultados estáveis e com boa repetibilidade. Além disso, os resultados devem demonstrar o potencial do sistema em avaliar os fenômenos transientes que ocorrem na combustão de carvões pulverizados no processo de injeção em altos-fornos siderúrgicos.

5.2.1 Preparação das Amostras de Combustível Sólido.

5.2.1.1 Seleção dos Combustíveis

Para avaliar-se o desempenho com combustíveis sólidos de características diferentes, foram selecionadas três carvões minerais e um coque de petróleo. Dois dos carvões minerais selecionados são importados e utilizados habitualmente nos altos-fornos brasileiros; o carvão BV é um carvão betuminoso baixo volátil e o carvão AV1 é um carvão betuminoso alto volátil. O carvão AV2 é o carvão do Leão beneficiado, um carvão subbetuminoso alto volátil, enquanto o coque de petróleo CP é originário de refinarias nacionais. Na Tabela 2 são apresentadas algumas características relevantes destes combustíveis.

O carvão do Leão beneficiado AV2 e o coque de petróleo nacional CP foram selecionados para, na continuidade deste projeto do LASID-UFRGS, se avaliar seu potencial de utilização em misturas para Injeção em altos-fornos nacionais, em substituição parcial dos carvões importados. O carvão subbetuminoso nacional AV2 é bastante similar na maioria de suas características ao carvão ao carvão betuminoso importado AV1, porém difere dele por não apresentar nenhuma característica aglomerante, pois seu índice de inchamento livre FSI (*Free Swelling Index*) é zero. Além da redução do teor de cinzas, o beneficiamento reduziu igualmente o teor de enxofre do carvão do Leão a um valor aceitável, inferior a 1 %. Já o coque de petróleo foi selecionado pelo seu baixíssimo teor de cinzas e elevado poder

calorífico, o que o torna elegível para misturas com carvões nacionais com teores de cinzas mais elevados que 10 %, que é o teor máximo recomendado para injeção em altos-fornos.

Tabela 2: Características dos combustíveis selecionados.

COMBUSTÍVEL	AV1	AV2	BV	CP
Análise Imediata (% , bs)				
- Cinzas - CZ	10,8	18,9	10,6	0,2
- Matéria Volátil - MV	38,0	32,3	15,4	10,4
- Carbono Fixo - CF	51,2	48,8	74,0	89,4
Relação CF/MV	1,3	1,5	4,8	8,6
Análise Elementar (% , bsic)				
- Carbono	73,6	63,8	81,4	90,2
- Hidrogênio	5,0	4,1	3,9	3,8
- Nitrogênio	1,6	1,1	1,7	2,3
- Oxigênio	8,3	11,5	1,6	2,7
- Enxofre Total	0,8	0,6	0,7	0,8
PCS (MJ/kg)	29,8	25,0	31,5	35,9
FSI	2,0	0,0	1,5	n.a.

bs: base seca; bsic: base seca isenta de cinzas); PCS: poder calorífico superior; FSI: índice de inchamento livre (*free swelling index*); n.a.: não aplicável.

Fonte: Adaptada de MACHADO et al., 2017.

5.2.1.2 Preparação das Amostras

A amostra de carvão do Leão foi preparada a partir de uma amostra de 400 kg da Mina Leão II, localizada do município de Minas do Leão-RS, fornecida pela empresa mineradora, no Laboratório de Processamento Mineral – LAPROM da UFRGS em duas fases. Na fase inicial, a amostra de 400 kg passou por processos de quarteamento, britagem e peneiramento, até obter-se uma amostra representativa de 25 kg conforme as etapas seguintes:

- Quarteamento inicial em duas etapas sucessivas para obter-se uma amostra representativa de 100 kg.

- Britagem de uma amostra de 100 kg até granulometria menor que 50 mm.
- Quarteamento para obtenção de quatro amostras representativas de 25 kg.
- Peneiramento de duas das amostras para remoção de finos abaixo de 1 mm.

Uma amostra peneirada de 25 kg foi utilizada para obter-se em laboratório a curva de lavabilidade na faixa de densidades de 1,3 até 2,4 pelo método afunda-flutua em meios densos líquidos, utilizando-se para isso misturas de densidade ajustada de líquidos orgânicos (xileno, percloroetileno, bromofórmio). A partir desta curva, que registra a recuperação de massa do flutuado para cada faixa densimétrica, e da análise dos carvões obtidos em cada faixa, definiu-se o flutuado na densidade 1,5 como a amostra desejada, para obtenção de um carvão beneficiado com cerca de 20 % de cinzas, teor de enxofre abaixo de 1 % e recuperação de 20 % em relação à amostra original de carvão ROM, com 52 % de cinzas. Com uma segunda amostra de 25 kg de carvão na faixa 50 – 1 mm, obteve-se cerca de 5 kg de carvão beneficiado com as características desejadas.

As amostras dos carvões importados foram fornecidas por empresas siderúrgicas nacionais e a de coque de petróleo por uma refinaria brasileira. As amostras dos quatro combustíveis foram inicialmente cominuídas em moinho laboratorial até granulometria abaixo de 250 μm (malha ASTM 60), para obtenção das amostras para caracterização físico-químicas. Através de novas etapas de moagem, a granulometria das amostras foi reduzida até 100 % abaixo de 75 μm (malha ASTM 200), faixa semelhante à utilizada nos processos de injeção nos altos-fornos.

Para os ensaios de combustão no simulador, decidiu-se por uma amostra de carvão em faixa estreita de granulometria, com relação entre diâmetro superior e diâmetro inferior igual a 2. As partículas menores que 36 μm (malha ASTM 400) foram removidas com o auxílio de um peneirador a jato de ar modelo RETSCH AS200jet. A escolha dessa faixa granulométrica foi estabelecida, seguindo procedimentos experimentais utilizados em equipamentos do tipo DTF (POHLMANN *et al.*, 2017). A alta combustibilidade dos finos pode mascarar a diferença de combustibilidade entre combustíveis de características diferentes. Além disso, o processo sequencial de secagem, aquecimento, desvolatilização, combustão dos

gases, combustão dos sólidos é mais rápido para os finos, superpondo-se ao processo da fração mais grossa, dificultando sobremaneira a análise do processo global de combustão. As amostras preparadas na faixa granulométrica selecionada foram secas por um dia em estufa e guardadas em dessecador. Por ocasião da realização dos ensaios, foram pesadas as alíquotas com as massas definidas para os ensaios programados para aquele dia e mantidas em dessecador.

5.2.2 Testes Preliminares

Antes dos testes de combustão, foram realizados testes preliminares a frio, portanto sem combustão de carvão, para se verificar a eficiência do pulso de arrastamento da amostra de carvão pulverizado, ou seja, qual a fração de massa de carvão alimentada que é coletado no filtro coletor de char. Nestes testes, variaram-se a pressão das duas zonas, a diferença de pressão entre elas (intensidade do pulso), o tempo de abertura da válvula VSD65 (duração do pulso), para diferentes massas de carvão alimentadas. Estes ensaios preliminares, realizados em grande número, se mostrarem importantes para avaliar se o pulso é suficientemente eficiente, se as válvulas e instrumentos envolvidos estão funcionando adequadamente, se os resultados são consistentes e repetitivos

A baixa eficiência e repetibilidade insatisfatória dos resultados iniciais levou à um novo projeto da zona de alimentação do carvão, como já mencionado na seção 4.2.2.2, com a substituição da tubulação inicial de 1" por uma de ½", para se obter um aumento significativo na velocidade dos gases na zona de alimentação do carvão. Foram também testadas válvulas de diferentes modelos e dimensões na posição VSD65 para se obter um pulso de intensidade satisfatória. Selecionou-se uma válvula de diafragma de ½", fabricada pela empresa Belton, de São Leopoldo/RS, com membrana de viton, por ser este material mais resistente à exposição prolongada ao oxigênio puro sob pressão de até 6 bar. A válvula diafragma proporciona um fluxo consistente e, na dimensão selecionada, tem uma vazão máxima de 70 L/s.

Inseriu-se também no circuito uma válvula de retenção VR65 para proteção da membrana da válvula de diafragma. Partículas de combustível remanescente na zona de alimentação após o tiro podem ser arrastadas até a membrana pelo

contrafluxo de gás no momento do pico de pressão que ocorre durante a combustão instantânea dos gases gerados durante a desvolatilização. Antes da instalação desta válvula de retenção, as membranas se rompiam após poucos testes. Na avaliação das membranas rompidas, observava-se a presença de partículas de combustível aderidas e perda de elasticidade da membrana. Supôs-se que a causa fosse um aumento de temperatura superficial da membrana pela oxidação prolongada das partículas aderidas por ação da atmosfera de oxigênio puro sob pressão.

Nova série de testes após as modificações mostrou um aumento importante tanto na eficiência de arraste como na repetibilidade dos resultados. Os resultados foram considerados satisfatórios para as variáveis massa de carvão, duração do pulso e intensidade do pulso testadas e as eficiências obtidas passaram a ser utilizadas na avaliação dos testes posteriores com combustão de carvão.

5.2.3 Testes de Combustão

Na fase de testes pré-operacionais foram realizados sistematicamente somente testes de combustão com oxigênio puro para avaliar a influência de parâmetros operacionais considerados relevantes: massa da amostra de combustível, natureza do combustível, pressão de gatilho e pressão do oxigênio.

Alguns poucos testes exploratórios realizados, cujos resultados não serão apresentados neste trabalho, buscaram investigar o comportamento do sistema para a combustão de carvão do Leão com ar sintético, para a pirólise de carvão do Leão em atmosfera de nitrogênio e para a combustão de moinha de carvão vegetal com oxigênio.

Nesta fase de testes pré-operacionais, para os quatro combustíveis selecionados, com uma diferença de pressão de gatilho fixa de 2 bar definida a partir dos resultados dos testes preliminares, os parâmetros experimentais de estudo definidos para os ensaios de combustão com oxigênio puro foram:

- Massa de combustível alimentado de 1,0 g, 1,5 g e 2,0 g.
- Pressão de oxigênio na combustão: 2 bar e 3 bar absolutos.
- Pressão de oxigênio de gatilho: 4 bar e 5 bar absolutos.

Para limitar o número de testes pré-operacionais sistemáticos nesta fase, optou-se por não estudar o efeito das temperaturas dos fornos de pré-aquecimento e de combustão. Por precaução, considerando a ocorrência do acidente de ruptura explosiva de um reator de alumina, fato relatado no último parágrafo da seção 4.3.2, optou-se por utilizar um reator de aço inoxidável 310. Por isso, para os ensaios de combustão com oxigênio, as temperaturas dos fornos de pré-aquecimento e de combustão foram fixadas em 1000 °C.

As variáveis de resposta selecionadas foram o *burnout*, que mede a eficiência de conversão da matéria orgânica do carvão, constituída pelas frações Matéria Volátil e Carbono Fixo, em produtos gasosos e a relação CO/CO₂ nos gases de combustão, que indica a eficiência da combustão da fração de carvão convertida em produtos gasosos. Como o carbono é o elemento oxidável majoritário na composição elementar do carvão e a oxidação do hidrogênio é mais rápida que a do carbono, considera-se que, quanto maior for a relação CO/CO₂, menos eficiente foi o aproveitamento energético do carbono convertido do carvão por oxidação total até CO₂.

Após cada ensaio, foram coletadas uma amostra dos gases de combustão, e enviada para análise cromatográfica, e uma amostra de char, enviada para análise de *burnout*. Estas análises foram realizadas nos laboratórios analíticos do LASID, utilizando-se um cromatógrafo a gás Shimadzu, modelo GC-2014 com detector de condutividade térmica para a análise da composição dos gases de combustão e uma termobalança NETSCH modelo STA 409 PC LUXX para a análise de cinzas do char. A opção por análise de cinzas por combustão com ar em termobalança deve-se à massa insuficiente de char para adoção dos métodos normatizados de análise imediata de carvão.

A avaliação do *burnout* é utilizada habitualmente para avaliar-se a eficiência de sistemas industriais de combustão de carvão em fornos e caldeiras. Para esse fim, é também utilizada em fornos de laboratório de queda livre, os DTFs, na avaliação da qualidade de combustíveis. Nesse caso, o *burnout* se torna uma medida relativa de comparação do desempenho na combustão de diferentes combustíveis, sob as mesmas condições de pressão, temperatura, composição do gás comburente e tempo de residência ajustados nos testes laboratoriais. Nesta

perspectiva, foi adotado como variável de resposta para os combustíveis testados no simulador do LASID.

O cálculo do *burnout* foi feito a partir dos valores determinados dos teores de cinzas base seca do carvão testado e do respectivo char. Os teores de cinzas nos dois casos foram determinados por ensaios termogravimétricos de combustão em presença de ar, aquecendo-se a amostra até 1000 °C a uma taxa de 30 °C/min, até peso final constante.

A equação de cálculo do *burnout* tem como premissa que a massa de cinzas do carvão inicial é igual a massa de cinzas do char final, isto é, que toda a perda de massa ocorrida no processo de combustão ocorre por consumo da matéria orgânica do carvão e que eventuais variações de massa dos componentes minerais do carvão por oxidação, ustulação, desidratação e carbonatação são equivalentes às que ocorrem no método analítico. Por esse motivo, a mesma metodologia de determinação de cinzas foi adotada para o carvão e para o char. A partir dos teores percentuais de cinzas do carvão Cz_i e do char Cz_f , pode-se calcular o *burnout* (B (%)) pela equação 6 (POHLMANN *et al.*, 2017):

$$B(\%) = \left(1 - \frac{Cz_i}{Cz_f} \times \frac{(100 - Cz_f)}{(100 - Cz_i)}\right) \times 100 \quad (6)$$

Ensaios de *burnout* foram realizados para os quatro combustíveis selecionados, para três níveis de massa de amostra injetada. A variação de massa injetada para iguais condições de pressão e temperatura de oxigênio significam uma alteração da relação comburente/combustível, representada simplificada pela razão atômica O/C (oxigênio/carbono). Através de análise estatística, verificou-se que a variabilidade dos resultados de *burnout* seguem uma distribuição normal e podem ser representados pela média e desvio padrão.

A composição dos gases de combustão foi analisada por cromatografia gasosa quanto a cinco componentes N_2 , H_2 , CO , CO_2 e CH_4 , que são os principais gases resultantes de um processo de combustão de carvões com baixo teor de enxofre. O cromatógrafo utilizado não dispõe de um detector adequado para a determinação do teor de oxigênio residual pós-combustão. A amostra de gases de combustão poderá ter um valor variável de oxigênio e de nitrogênio. Como o reservatório de coleta de gases está sob vácuo parcial, já existe aí um estoque de

oxigênio no início do processo de coleta dos gases de combustão. Durante a coleta de gases, pode ainda haver a sucção de nitrogênio originário do fluxo de resfriamento e inertização da amostra de char depositada no filtro de bronze. Por isso, para análise de resultados as composições de H₂, CO, CO₂ e CH₄ foram calculadas em base isenta de nitrogênio. As concentrações mínimas de H₂ e CH₄ mesmo nessa base, especialmente nos ensaios com coque e carvão baixo volátil, levou a considerar-se a relação CO/CO₂ como a melhor opção para comparar-se a eficiência de combustão da matéria orgânica convertida para todos os combustíveis avaliados.

Os simuladores do tipo Aachen costumam usar esta relação CO/CO₂ para avaliar a combustibilidade dos carvões como variável de resposta em ensaios padronizados e métodos de cálculo da eficiência de combustão próprios de cada laboratório, já que geralmente não coletam nem analisam amostras de char.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS TESTES PRÉ-OPERACIONAIS

Alguns resultados dos testes pré-operacionais realizados no simulados do LASID foram apresentados recentemente pela equipe de projeto no V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral (BARBIERI *et al*, 2017), em artigo submetido à revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, publicada pela Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (MACHADO *et al*, 2017) e também na tese de doutorado de um dos membros da equipe, defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG em setembro de 2017 (MACHADO, 2017).

5.3.1 Eficiência de arraste

Na definição da metodologia para os ensaios de combustão que proporcionasse resultados repetitivos capazes de discriminar a influência da natureza do carvão, das concentrações dos reagentes e das condições de pressão e temperatura de combustão, foram realizados testes para definir as melhores condições de injeção de combustível pulverizado, já na granulometria pré-definida, em termos de massa de amostra e pressões de gatilho.

Definiu-se como eficiência de arraste como a fração da massa de combustível alimentada que é coletada no filtro de bronze. As massas de combustível deveriam ser compatíveis com a disponibilidade de comburente e com a possibilidade de coleta de uma quantidade de resíduo sólido pós-combustão que atendesse às necessidades dos ensaios analíticos. Mesmo que uma alta eficiência de arraste seja desejável, o objetivo principal dos testes foi a definição as condições de tiro com a menor dispersão de resultados, que permitisse a obtenção de dados suficiente precisos com o menor número de ensaios experimentais. Adicionalmente buscou-se minimizar a pressão da região de pulso, ou seja, a massa de gás frio a ser injetada para o arraste do combustível. Quanto maior a massa de ar frio injetada, menor será a temperatura no ponto de mistura do combustível com o gás oxidante pré-aquecido. Esta fase de testes se prolongou por diversos meses pelas razões detalhadas anteriormente na seção 5.2.2.

Todos os testes de arrastamento foram realizados com nitrogênio na temperatura ambiente. A Figura 14 apresenta um gráfico típico de um teste de arrastamento, mostrando a evolução das pressões da zona de alta pressão IP60, da região de alimentação do carvão IP65 e da região do filtro de coleta dos sólidos arrastados IP75. Neste ensaio, adotou-se uma diferença de pressão (Δp) para o tiro de cerca de 2,3 bar.

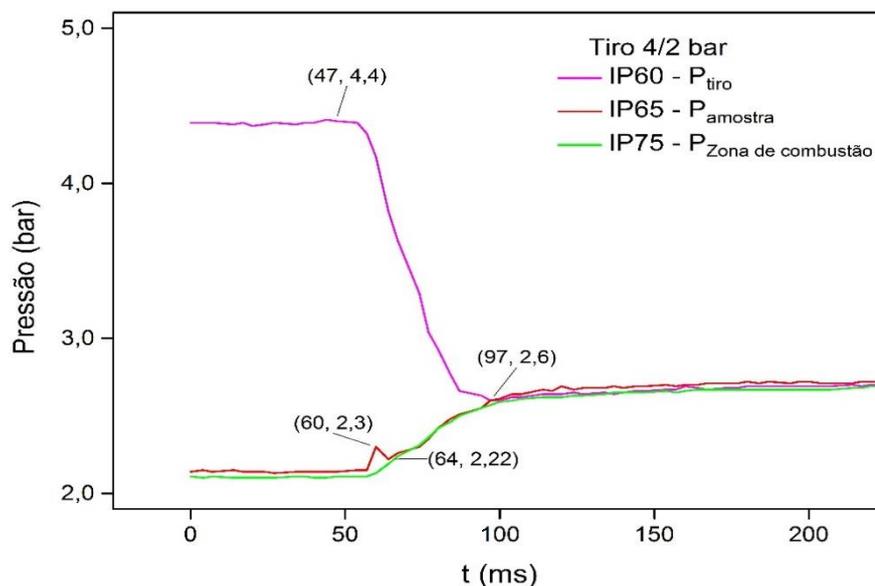


Figura 14: Perfil de pressões durante um pulso em vazio para Δp de tiro de 4/2 bar.

Fonte: MACHADO, 2017.

No início do pulso, ocorre uma queda rápida de pressão na zona de alta pressão, de 4,4 bar para 2,7 bar em cerca de 40 ms, seguida de uma queda lenta até o valor de 2,6 bar em 10 ms, quando atinge uma pressão de equilíbrio para todo o sistema pois a válvula de diafragma ainda está aberta. Neste intervalo inicial de 50 ms, a pressão da zona de baixa pressão cresce menos rapidamente de 2,1 bar para 2,6 bar, o que se explica pelo seu maior volume em relação ao da zona de alta pressão, pois seu volume é muito superior ao da zona de alta pressão. O tempo para equalização das pressões varia de 40 a 50 ms, dependendo do valor das pressões nas duas zonas e da diferença de pressão entre elas.

Pelo gráfico, observa-se que a taxa de queda de pressão na zona de alta pressão é de cerca de 42 bar/s nos primeiros 40 ms e de 10 bar/s nos 10 ms seguintes, ou seja, de 36 bar/s até a equalização das pressões.

O pico de pressão durante cerca de 8 ms registrado pelo IP65 logo no início de pressão ocorre em todos os ensaios de arraste. É causado pela propagação da onda de pressão desde a saída da válvula de diafragma até o filtro de bronze, onde se reflete e retorna na até o sensor IP65. Neste processo a onda de pressão percorre um trajeto de cerca de 3,6 m, o que permite estimar-se uma velocidade média de cerca de 450 m/s, valor compatível com o deslocamento em atmosfera de nitrogênio a uma pressão absoluta de 3,2 bar.

Com as pressões iniciais de cada zona antes do pulso e pressão e a pressão final de equilíbrio, considerando que nestes 50 ms o volume de gás que atravessa o filtro sinterizado de bronze pode ser desconsiderado e que o nitrogênio nestas condições de pressão e temperatura segue a equação de estado dos gases ideais, obtém-se que o volume da zona de baixa pressão até o filtro de bronze é aproximadamente 3,6 vezes maior que o volume da zona de alta pressão.

Com base na perda de massa na zona de alta pressão na fase rápida do pulso, pode-se calcular a vazão média através da válvula de diafragma VSD65 e a velocidade do gás na zona de arraste. Para os dados do ensaio apresentado na Figura 14, considerando a pressão absoluta média de 3,3 bar na zona de

alimentação durante o pulso e o diâmetro interno da tubulação de 1/2", obtém-se a velocidade do gás de arraste de 5 a 6 m/s na pressão e temperatura do local. Considerando-se que a granulometria máxima das partículas é 75 µm, a densidade máxima é 1,5, com o gás pressurizado a 3,2 bar absolutos, tem-se uma velocidade suficiente para o transporte das partículas.

O filtro de bronze sinterizado FCA75 atualmente utilizado é um acessório com perda de carga elevada, que limita significativamente a vazão do gás durante o pulso. Isto ficou comprovado através de muitos ensaios, pois o perfil de pressões durante o pulso praticamente não se alterou quando se varia a pressão na zona de combustão ou a diferença de pressão entre as zonas no pulso (pressão de gatilho). Estão previstos testes futuros com outros tipos de filtro com menor perda de carga, porém que garantam a coleta total dos particulados para proteção das válvulas pós-filtro, em especial, a membrana da válvula de diafragma VSD77 antes do cilindro de coleta de gases de combustão.

A Figura 15 apresenta os resultados de eficiência de arraste a frio para a injeção de 1,0, 1,5 e 2,0 g do carvão AV2 na faixa granulométrica de 36 µm a 75 µm, para gatilho de pulso de 5 bar para 3 bar absolutos. Os testes com os demais combustíveis selecionados deram resultados similares, o que era esperado, pois têm a mesma granulometria e densidades e formatos de partícula similares.

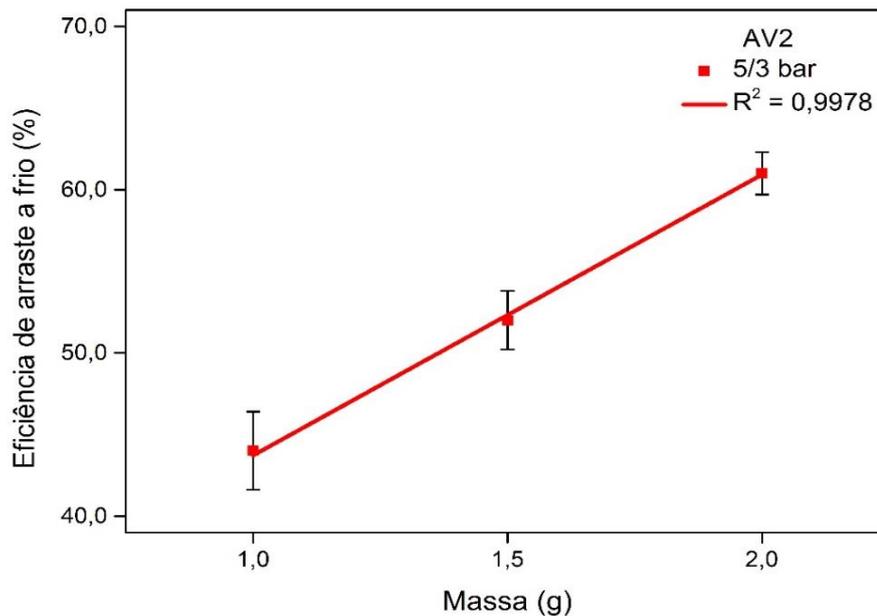


Figura 15: Eficiência de arraste a frio para Δp de 5/3 bar.

Fonte: BARBIERI et al, 2017.

Observa-se que a eficiência de arraste aumenta com a massa de combustível alimentado. Esta dependência pode ser considerada linear no intervalo de massas testado. Também o desvio padrão dos valores experimentais da eficiência de arraste diminui com o aumento da massa alimentada. No decorrer desta fase de ensaios, observou-se também que a variação da umidade do combustível e a alteração da faixa granulométrica influem nos resultados da eficiência de arraste.

Em função dos resultados experimentais, definiu-se como a massa padrão a ser alimentada para os ensaios de combustão durante a fase pré-operacional do simulador o valor de 1,5 g. Esta escolha foi também fundamentada nos resultados dos ensaios de combustão que serão apresentados e discutidos nas próximas seções deste capítulo. Influuiu ainda na escolha a dificuldade e o tempo para preparação das amostras que apontavam para uma redução do tamanho da amostra, como adotado em outros simuladores tipo Aachen. A massa de 1 g foi considerada inadequada pela dispersão excessiva dos resultados experimentais, ao menos nessa fase de testes pré-operacionais.

Após cada ensaio de arraste a frio, realizava-se uma série de pulsos de limpeza em vazio para remoção da massa de amostra retida no equipamento. Com as massas de amostra adicionais coletadas no filtro de bronze, totalizava-se uma recuperação entre 97 e 99 % da massa da amostra original. Isto indicava que, durante o pulso de arraste, ocorria uma considerável retenção de sólidos particulados ao longo do trajeto entre o local de alimentação de carvão e o filtro de bronze. Apesar do aumento de eficiência de arraste em termos percentuais com o aumento da massa de amostra, a quantidade de amostra retida também aumentou, como se vê na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Distribuição da massa de amostra nos ensaios de arraste

Massa de Amostra (g)	1,0	1,5	2,0
Eficiência de arraste (%)	44	52	61
Massa coletada no filtro (g)	0,440	0,780	1,220

Massa retida no sistema (g)	0,560	0,720	0,780
-----------------------------	-------	-------	-------

As causas da retenção de parte da massa de amostra durante o pulso não foram investigadas com maior profundidade pela equipe de projeto. Como há purga do simulador com nitrogênio seco antes dos ensaios que também é usado como gás de arraste e as amostras de carvão são previamente secas, a deposição de umidade nas paredes das tubulações foi descartada como causa. O deslocamento de partículas sólidas finas, com alta relação área superficial/volume, em alta velocidade em ambiente de gás seco favorece a geração de carga elétrica estática que poderia causar a adesão temporária das partículas finas às superfícies sólidas. Outra causa possível seria o tipo de contato entre o gás de arraste com as partículas da amostra depositada no local de alimentação. Durante o tempo de pulso, as camadas de partículas em contato com o gás seriam arrastadas sucessivamente, uma após a outra, num efeito semelhante à ação do vento no transporte das dunas de areia. Todavia um aumento do tempo de pulso introduziria uma massa maior de ar frio no sistema e causaria uma redução significativa na região de mistura do carvão com a corrente de gás pré-aquecido.

5.3.2 Resultados dos testes de combustão

Os testes de combustão para cada condição selecionada foram realizados em triplicata. Os valores dos parâmetros de resposta selecionados para a avaliação da combustibilidade já mencionados previamente na seção 5.2.2.2, são o *burnout* ou eficiência de conversão a partir da análise do char e a relação CO/CO₂ a partir da análise dos gases de combustão. Estas informações só estarão disponíveis em data posterior à realização dos testes de combustão, em função do tempo necessário para a execução das análises laboratoriais.

Considerando-se que o simulador do LASID tem a capacidade única inovadora de adquirir e registrar a evolução dos valores de pressão e temperatura em regime transiente durante o curto intervalo de tempo de duração do ensaio de combustão através dos sistemas de aquisição rápida e lenta, pretendeu-se desenvolver um método de avaliação pelo próprio operador de perfis de pressão e

temperatura significativos que descrevam melhor o transcurso da combustão. Assim, o operador teria informações imediatas sobre a repetibilidade dos ensaios e uma primeira avaliação qualitativa, quiçá semi-quantitativa, da combustibilidade do carvão sendo testado. Nesta fase de testes pré-operacionais, não se obteve ainda um método satisfatório de análise dos perfis de pressões e temperatura durante a fase transiente de combustão, porém uma avaliação preliminar de perfis típicos obtidos nos ensaios e algumas considerações preliminares para o desenvolvimento deste método serão apresentadas nesta seção.

Antes da execução dos ensaios de combustão com amostras de combustível em triplicata, optou-se por realizar ensaios de combustão em vazio, ou seja, sem a alimentação do combustível, com a finalidade de se obter os perfis de evolução da temperatura durante o pulso sem a influência da combustão. Os testes em vazio são realizados com o gás de teste, através da rotina de combustão com os mesmos valores programados para as pressões de gatilho e de combustão, temperaturas dos fornos, tempos de acionamento das válvulas automáticas e vazões de gases.

5.3.2.1 Avaliação dos resultados dos testes em vazio

A Figura 16 apresenta os gráficos dos perfis de pressão (P) e temperatura (T) de um ensaio de combustão em vazio e com alimentação de 2,0 g de carvão AV2, com pressão absoluta de cerca de 3 bar na zona de combustão no início do pulso, com diferença de pressão de cerca de 2 bar no gatilho do pulso. Os gráficos registram a variação das pressões PI60 na zona de alta pressão, PI65 na região de alimentação do carvão e PI75 na zona de coleta do char (ordenadas à esquerda) e a variação da temperatura TI72 no ponto de mistura do carvão com os gases pré-aquecidos.

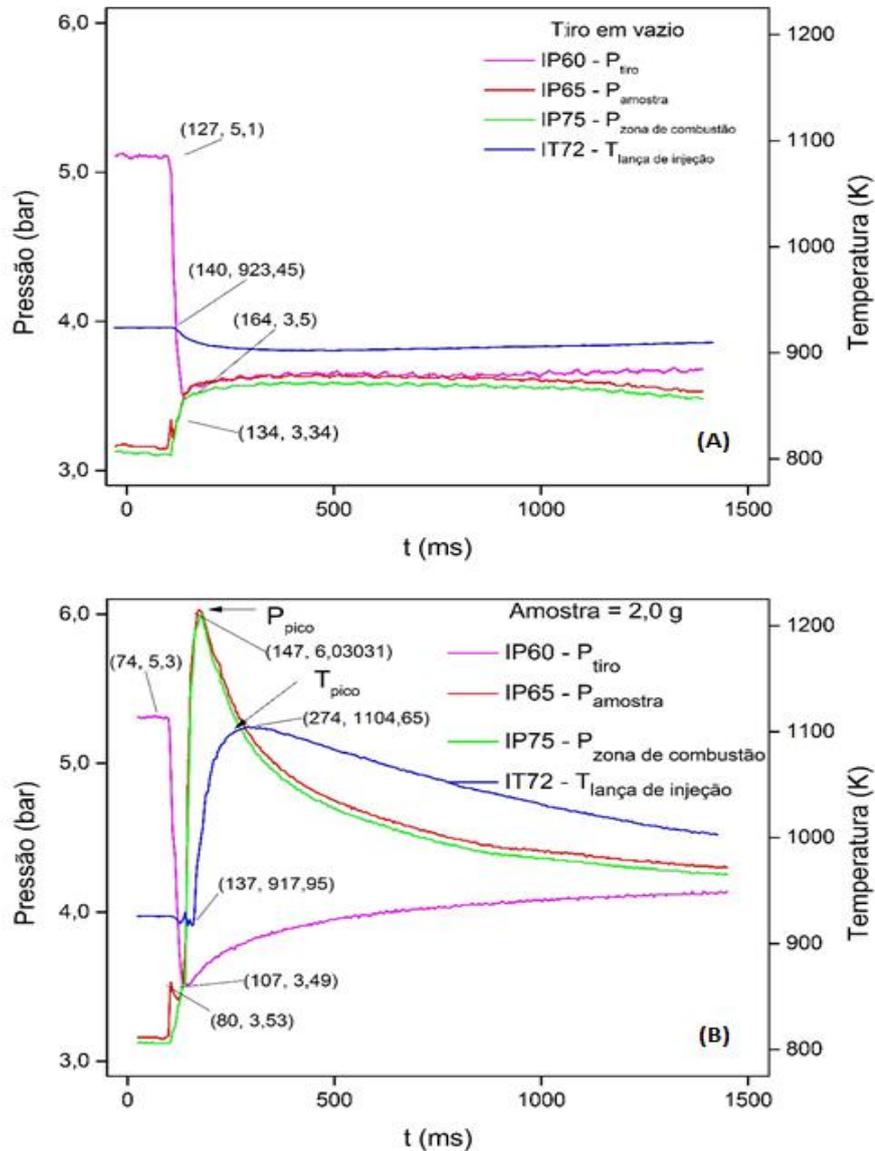


Figura 16: Ensaios de combustão com 100% O_2 a 3 bar. Gráfico superior: em vazio; gráfico inferior: com 2 g carvão AV2.

Fonte: MACHADO, 2017.

No gráfico do teste em vazio, vê-se que, durante o pulso, há a queda brusca de pressão PI_{60} e o ganho mais lento de pressão em toda a zona de combustão, PI_{65} e PI_{75} , até a equalização. Este intervalo inicial de tempo é de 37 ms neste ensaio; os valores experimentais situam-se sempre em torno de 40 ms, mesmo com a variação das condições de pressão das duas regiões.

O início da queda de temperatura no ponto de mistura indica o início do escoamento do gás frio até aquele ponto causado pelo pulso. O retardo de 13 ms em relação ao início da queda de pressão do PI65 é devido ao tempo de resposta diferente dos sensores PI e TI, já que o atraso gerado pelo tempo de deslocamento da onda de pressão nestas condições é de 1 a 2 ms. A pequena queda de temperatura registrada pelo TI72 durante este tempo indica que a vazão mássica de gás frio que chega ao ponto de mistura é muito menor que a proveniente da região de pré-aquecimento do gás. A partir da equalização das pressões PI60 e PI65, cessa a queda de temperatura no ponto de mistura e inicia-se um aumento “lento” de cerca de 10 a 20 °C/s da temperatura pela chegada gradual do gás armazenado no forno Jung.

Após cerca de 800 ms do início do pulso, a pressão na região de alta pressão PI60 mantém-se constante, enquanto a pressão PI65 na região de alimentação de carvão continua em queda “lenta”, devido ao fechamento completo da válvula de diafragma VSD65 que separa as duas regiões. O intervalo de tempo programado para o pulso de injeção é de 500 ms, o que comprova o tempo rápido de resposta da válvula de diafragma, inferior a 1 s, conforme suas especificações.

Após o período inicial até a equalização das pressões, o regime de escoamento na zona de combustão passa a ser comandado agora comandado pela diferença de pressão entre a pressão PI50 no início da região de pré-aquecimento dos gases (ver seção 4.3.2.3) e a PI75 junto ao filtro de coleta de char. Não se tem o registro da evolução da pressão do PI50 durante o ensaio, pois ela é adquirida e registrada pelo sistema de aquisição lenta de dados, devido à limitação do número de canais do sistema de registro dos dados de aquisição rápida. A pressão na zona de mistura não é medida, porém deve apresentar um valor intermediário entre os valores do PI50 e do PI75. O escoamento mais lento é devido à elevada perda de carga através do filtro de bronze sinterizado, localizado após o sensor PI75, mesmo para uma diferença de pressão acima de 2 bar através do filtro. Entre as melhorias futuras em estudo para o simulador, está o desenvolvimento de um sistema de coleta de char com baixa perda de carga que proporcione um escoamento muito mais rápido até o cilindro de coleta de gases de combustão, mas que garanta a coleta total do material sólido que chega até ele, como o atual.

5.3.2.2 Avaliação dos resultados do teste com carvão

Comparando-se os gráficos dos testes sem e com combustão de carvão, vistos na Figura 16, observa-se que os perfis de evolução das pressões e da temperatura praticamente não diferem até o momento de equalização das pressões, ou seja, nos 40 a 50 ms iniciais do pulso. A seguir, no ensaio com combustão, todas as pressões e a temperatura no ponto de mistura passam a aumentar rapidamente até seus valores máximos (P_{pico} e T_{pico}). Este aumento rápido é causado pelo início da fase de desvolatilização rápida e combustão imediata dos gases de pirólise produzidos. A desvolatilização é endotérmica, logo reduz a temperatura, e produz um volume elevado de gases, aumentando a pressão, especialmente no caso de carvões alto voláteis, como é o caso do carvão AV2 utilizado neste ensaio.

O aumento rápido da pressão ocorre a partir do no momento da equalização de pressões, a 33 ms após o início do pulso para este teste, atingindo o valor máximo P_{pico} em mais 40 ms. Como a elevação de pressão neste período é de 2,5 bar, o fenômeno da combustão instantânea dos gases de pirólise acarreta um aumento de pressão a uma taxa de 62 bar/s, muito elevada

As pressões IP65 e IP75 coincidem durante toda esta fase de aumento da pressão, confirmando que o fenômeno ocorre em todo o volume do simulador limitado pela válvula VS50 (entrada da zona de pré-aquecimento), pela válvula VR 65 (entrada do pulso) e pelo filtro de bronze FCA75. O epicentro das ondas de pressão é a zona de combustão dos gases de pirólise, situada abaixo do ponto de mistura do carvão. Os ensaios de combustão com os outros combustíveis mostraram que o valor máximo do pico de pressão P_{pico} cresce com a massa e com o teor de voláteis do combustível, confirmando que quanto maior a massa de gases de pirólise gerados e queimados, maior o volume instantâneo de gases de combustão produzido.

Após atingirem a P_{pico} , as pressões IP65 e IP75 caem rapidamente, porém a uma taxa menor, indicando o final da etapa de combustão dos gases a partir do ponto em que a pressão IP75 se torna menor do que a IP65. Esta diferença é uma das forças motrizes de escoamento dos gases de combustão até o filtro FCA75. A combustão do carbono fixo do char após a pirólise, que também gera os gases de

combustão CO e CO₂, é muito mais lenta do que a combustão dos gases de pirólise. A taxa menor de geração de gases de combustão e o escoamento gradativo através do filtro de bronze até o cilindro de coleta de gases causam a redução gradativa das pressões nesta região. Mesmo após 1,4 s do início do pulso, que foi o tempo de aquisição rápida dos dados do ensaio, a pressão é ainda muito superior à anterior ao pulso.

O perfil de evolução da pressão IP60 da zona de alta pressão a partir do início da combustão dos gases evidencia a ação eficiente da válvula de retenção VR65, protegendo a membrana de viton da válvula de diafragma VSD65 contra um possível rompimento por choque de pressão, evento frequente antes da instalação da VR65, como já mencionado anteriormente.

A evolução da temperatura no ponto de mistura durante a combustão também apresenta um aumento de temperatura que tem seu início defasado em 30 ms em relação ao do aumento da pressão. Isto evidencia que a combustão dos gases de pirólise ocorre a alguma distância do ponto de mistura, pois o transporte do calor gerado instantaneamente na combustão é transportado pelos gases aquecidos por convecção forçada até o ponto de medida do termopar, enquanto que a onda de pressão se transmite sem transporte de matéria.

Após cerca de 140 ms, a temperatura TI72 atinge seu valor máximo T_{pico} , aumentando cerca de 90 °C, portanto a uma taxa média de 640 °C/s. Como a temperatura no ponto de mistura é de 650 °C, o aquecimento e pirólise das partículas de combustível na faixa granulométrica 36 µm - 75 µm é muito rápida. A determinação do ponto exato de início da combustão dos gases, bem como a temperatura máxima de chama não foi investigada nessa fase de testes pré-operacionais. Após atingir o T_{pico} , a temperatura decresce lentamente a uma taxa de 100 °C/s até o final do período de aquisição rápida, até um valor final cerca de 90 °C acima da temperatura daquele ponto.

O comportamento do perfil de temperatura é similar ao dos perfis de pressão. Os valores de pressão e temperatura no final do registro de aquisição rápida significativamente maiores do que os valores medidos antes do início do pulso sugerem que talvez não se tenha colhido o volume total de gases de combustão gerados no ensaio, pois o final da coleta de gases coincide aproximadamente com o

final do registro no gráfico. Este é um motivo a mais para buscar-se o desenvolvimento de um sistema de coleta de char com menor perda de carga e assim aumentar a velocidade de escoamento dos gases de combustão até o cilindro coletor de amostras.

A temperatura de 650 °C no ponto de mistura é a máxima obtida naquele ponto durante a fase de testes pré-operacionais e foi adotada em todos os ensaios com os combustíveis e condições selecionadas. Este valor é bastante inferior ao pretendido no projeto conceitual do simulador. Por isso, já estão em estudo alterações do sistema de pré-aquecimento e das rotinas operacionais para possibilitar o atingimento de temperaturas mais elevadas naquele ponto durante os ensaios de combustão.

Considerando-se a evolução dos perfis de temperatura e pressão, pode-se inferir que o tempo de residência de residência das partículas de carvão na zona de combustão é bastante curto, como acontece nas ventaneiras e na zona de combustão dos altos-fornos. Todavia, a análise dos dados obtidos na fase pré-operacional não permite uma avaliação mais precisa do tempo de residência. A queda mais lenta da temperatura do ponto de encontro após atingir a T_{pico} é atribuída principalmente ao escoamento lento dos gases de combustão exaustos através do filtro de bronze sinterizado, não sendo assim um resultado que possa auxiliar na determinação do tempo de combustão propriamente dito. Para tanto, estão planejados ensaios de combustão com pulsos muito curtos que terão seu decurso registrado pela filmadora de alta velocidade. Através da análise de imagens obtidas nestes ensaios, será possível obter-se informações mais precisas para o cálculo do tempo de residência das partículas no combustor para diferentes condições de teste.

A evolução dos perfis de pressão e temperatura não permite distinguir-se claramente as fases de aquecimento e desvolatilização do carvão, endotérmicas, das fases de combustão dos gases e combustão do carbono fixo do char após a desvolatilização. Como as taxas com que estes fenômenos ocorrem são influenciadas pelo tamanho das partículas de combustível, eles se superpõem durante os ensaios padronizados de combustão. Para uma futura investigação mais aprofundada destas etapas, estão previstos ensaios de pirólise dos combustíveis

com nitrogênio e ensaios de combustão das amostras previamente desvolatilizadas com oxigênio.

Os ensaios de combustão com os outros combustíveis mostraram que o valor máximo do pico de pressão P_{pico} cresce com a massa e com o teor de voláteis do combustível, confirmando que quanto maior a massa de gases de pirólise gerados e queimados, maior o volume instantâneo de gases de combustão produzido.

A Figura 17 apresenta os gráficos com a evolução dos perfis de temperatura e pressões obtidos nos testes combustão do carvão AV2 com oxigênio de 3 massas de amostra: 1,0 g, 1,5 g e 2,0 g.

Como os testes são realizadas num reator de volume constante e em condições aproximadamente adiabáticas, pois a taxa de geração de calor pelas reações fortemente exotérmicas é muito maior do que as perdas para o ambiente externo no curto espaço de tempo em que ocorre a combustão, os rápidos aumentos de temperatura, além da geração da massa de gases, contribuem para as elevadas taxas de aumento de pressão.

As pressões e a temperatura no ponto de mistura evoluem ao longo do ensaio de forma similar para as três massas testadas. O início da combustão dos gases se dá em todos os casos logo após a equalização das pressões, cerca de 10 ms, ou seja, em torno de 50 ms do início do pulso. Todavia, as taxas de aumento das pressões e da temperatura na fase inicial da combustão dos gases e os valores máximos atingidos, P_{pico} e T_{pico} , são distintamente diferentes para as três massas testadas

Observa-se que, além da pressão P_{pico} aumentar com a massa de amostra, também a taxa de aumento das pressões $\Delta p/\Delta t$ cresce com a massa de amostra. A diferença de P_{pico} é maior entre as massas de 1,0 g e 1,5 g do que entre as massas de 1,5 g e 2,0 g. Uma causa possível seria que, mesmo com a maior geração de gases de pirólise com o aumento da massa, a disponibilidade de oxigênio para a combustão instantânea dos gases de pirólise comece a limitar a taxa de combustão, isto por que aumentaria a dificuldade de se obter uma mistura instantânea de todos reagentes gasosos, combustíveis e comburente.

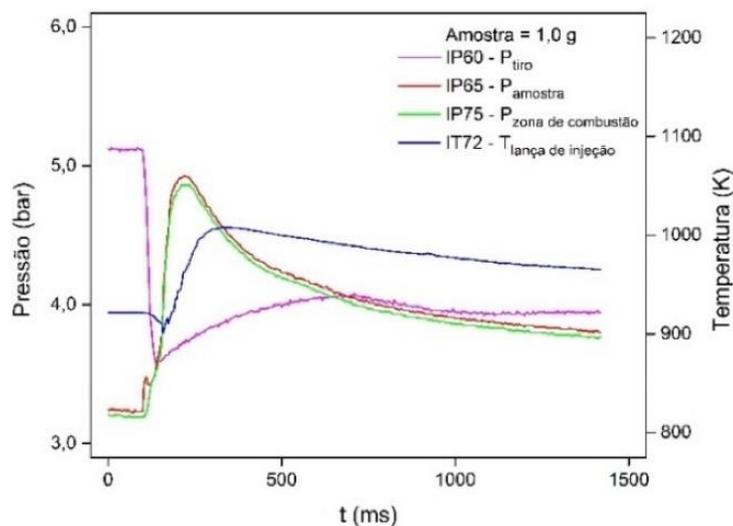
O valor máximo da temperatura T_{pico} no ponto de mistura cresce significativamente com o aumento da massa de amostra de 1,0 para 1,5 g, mas já

decrece um pouco com o aumento de 1,5 g para 2 g. O mesmo comentário sobre uma causa possível para este decréscimo feito no parágrafo anterior aplica-se aqui. Além disso, a etapa endotérmica de aquecimento e desvolatilização de uma massa maior deve aumentar a duração desta etapa prévia à combustão dos gases, aumentando assim a distância do ponto de medida da temperatura até o ponto de início da combustão dos gases. Com isso, a taxa de transferência de calor pelo deslocamento por convecção forçada da massa gasosa aquecida entre esses dois pontos deve cair, já a ponto de causar uma leve redução da T_{pico} .

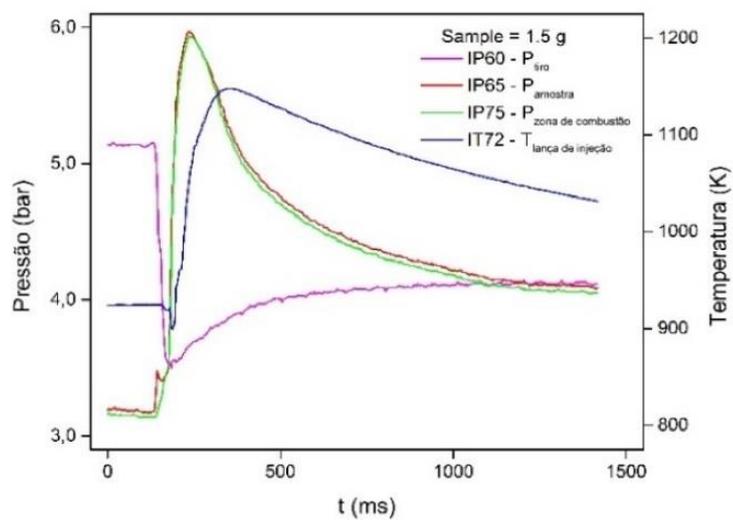
O mesmo efeito observado na T_{pico} ocorre também com a taxa de aumento da temperatura $\Delta T/\Delta t$. Ocorre aumento observável na variação da massa de amostra de 1,0 g para 1,5 g. Já a diferença das taxas para as amostras de 1,5 g e 2,0 g não é claramente perceptível. Portanto, para a variação da taxa $\Delta T/\Delta t$, podem ser feitos os mesmos comentários recém feitos para a variação da T_{pico} .

Além do efeito da massa de amostra, também foi estudado o efeito da pressão do oxigênio na evolução dos perfis de combustão e nas variáveis de resposta selecionadas para avaliação da combustibilidade através da eficiência de conversão e eficiência de combustão (ver seção 5.2.3): *burnout* e relação CO/CO₂.

a) 1,0 g carvão
AV2, 100% O₂



b) 1,5 g carvão
AV2, 100% O₂



c) 2,0 g carvão
AV2, 100% O₂

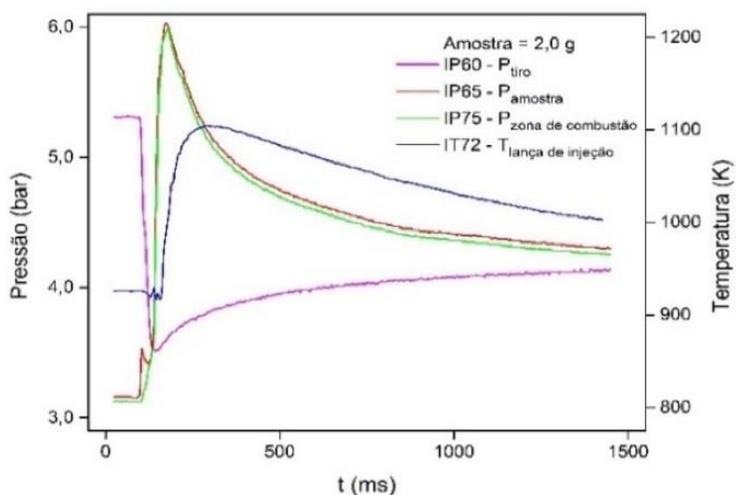


Figura 17: Comparação da evolução das pressões e temperatura para diferentes massas de combustível na combustão de carvão AV2 com oxigênio.

Fonte: MACHADO, 2017.

A Figura 18 apresenta os resultados médios dos testes de combustão com carvão AV2, realizados no mínimo em triplicata, com pressões absolutas de 3 e 2 bar de oxigênio e com massas de carvão de 1,0 g, 1,5 g e 2,0 g. Os resultados mostram a variação da temperatura máxima no ponto de mistura e da pressão máxima na região de combustão.

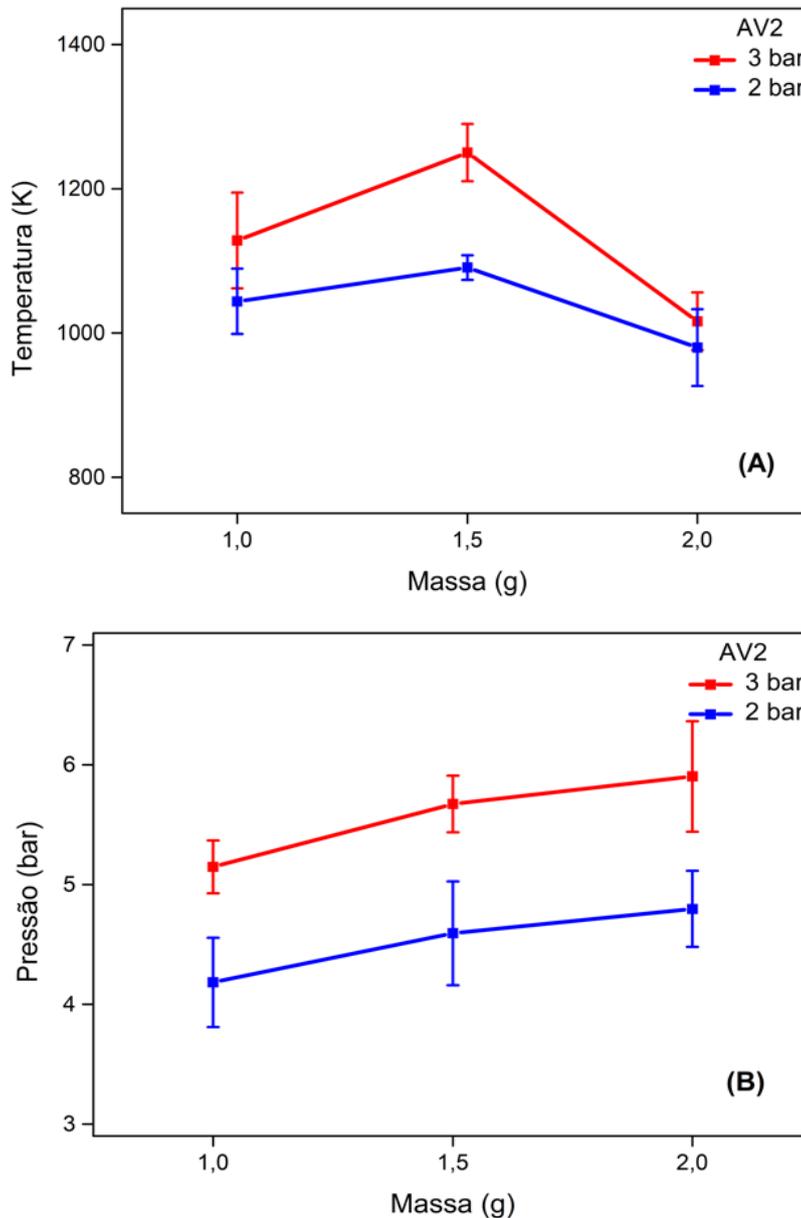


Figura 18: Variação da temperatura máxima (A) e pressão máxima (B) de combustão com a massa de carvão injetada e pressão de O_2 .

Fonte: MACHADO *et al*, 2017.

Os comportamentos dos valores máximos de pressão e temperatura para o carvão AV2 com a variação da massa de amostra já foram avaliados em parágrafos anteriores desta seção. Verifica-se que eles são similares para as duas pressões testadas. Tanto as temperaturas máximas como as pressões máximas aumentaram com a pressão de oxigênio para todas as massas testadas. A maior pressão de oxigênio aumenta as taxas de combustão do carvão, seja ela controlada pela cinética química ou pela difusão de oxigênio. O aumento das taxas de combustão acelera ainda mais reações químicas altamente exotérmicas, provocando um aumento rápido da temperatura de reação. A combustão dos gases de pirólise é muito rápida, assim como a subsequente combustão do carbono remanescente no char nas condições de temperatura e de concentração (pressão parcial) de oxigênio reinantes nos ensaios, com geração rápida e abundante de compostos gasosos produzindo CO₂, CO e H₂O (CARPENTER, 2006a; de GIROLAMO *et al.*, 2017). A combustão dos gases de pirólise é extremamente rápida e ocorre em poucos milissegundos (WU, 2005; KIM *et al.*, 2016).

Nas duas pressões testadas, observou-se um aumento da temperatura máxima com o aumento da massa de 1,0 g para 1,5 g e uma redução para o aumento de massa de 1,5 g para 2,0 g, efeito já comentado anteriormente nesta seção. A queda da temperatura máxima na variação de 1,5 g para 2,0 g é maior para a pressão de O₂ mais elevada. Não se tem por ora uma hipótese plausível para explicar este comportamento não esperado. Além da diferença na relação combustível/comburente, deve haver forte influência dos complexos fenômenos de transporte de calor e massa envolvidos na combustão e no transporte de calor até o ponto de medida da temperatura. Uma repetição desses testes com utilização dos termopares especiais japoneses (ver seção 4.3.3.3) inseridos na região da combustão poderá fornecer dados mais efetivos para o entendimento deste fenômeno.

Os testes recém comentados também forneceram informações sobre o *burnout* do char e sobre a relação CO/CO₂ na composição dos gases de combustão, variáveis de resposta selecionadas para a avaliação da combustibilidade (ver seção 5.3.2), como pode ser visto na Figura 19 a seguir.

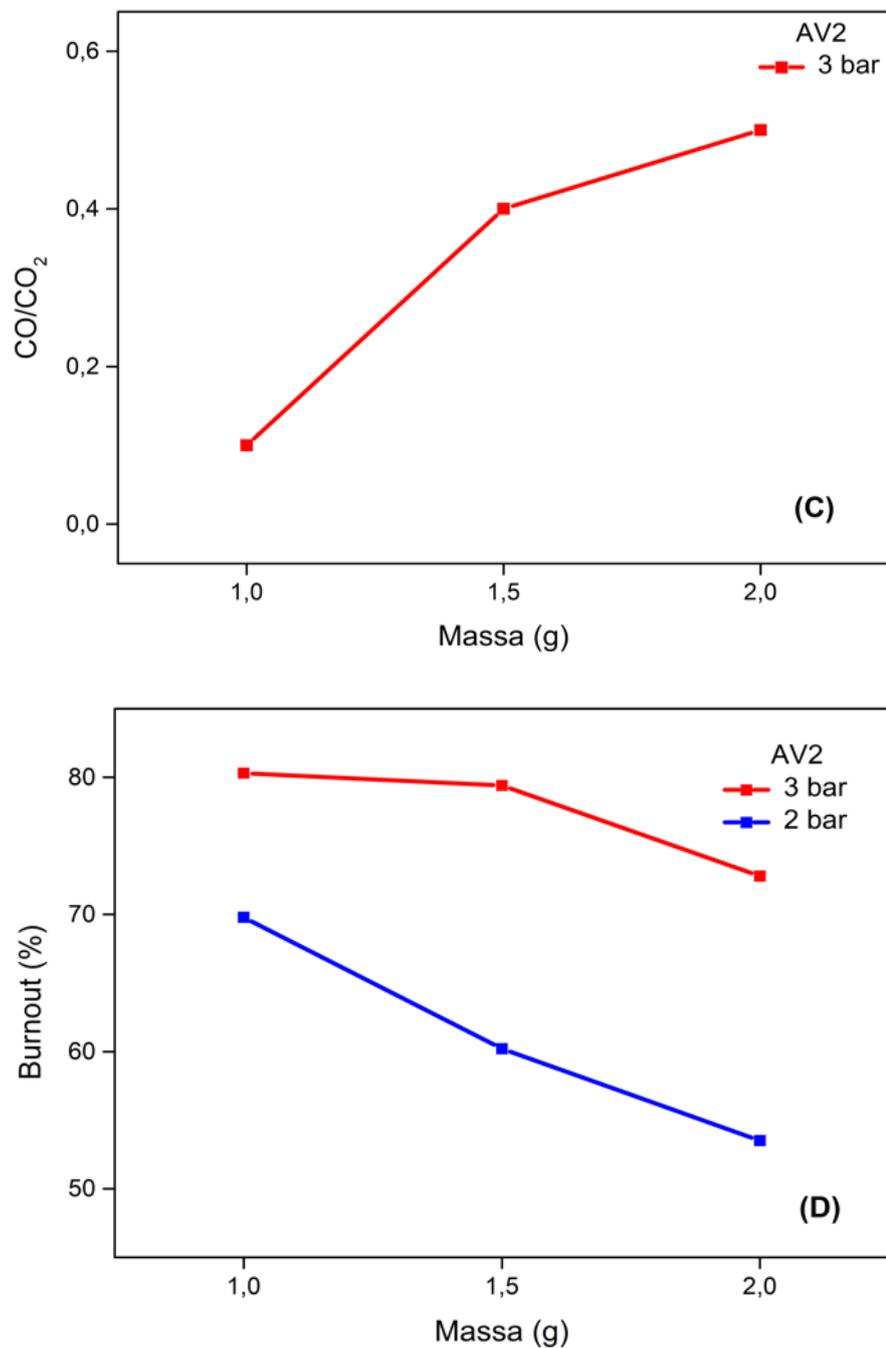


Figura 19: Variação da relação CO/CO₂ (C) e do *burnout* (D) com a massa de carvão injetada e da pressão de O₂.

Fonte: MACHADO *et al*, 2017.

Nesta fase de testes pré-operacionais, a variação da relação CO/CO₂ foi investigada apenas para a pressão de oxigênio de 3 bar. Observa-se no gráfico que os valores desta variável aumentaram com o aumento da massa de carvão. Isto

indica que a combustão dos gases de pirólise e a combustão do carbono fixo até CO_2 diminui com o aumento da massa de amostra para uma massa fixa de oxigênio, ou seja, da relação atômica O/C.

O aumento da massa da amostra leva a uma geração sensivelmente maior de gases de pirólise, cuja combustão é preferencial em relação ao char. A maior presença de CO, resultado da combustão incompleta do carbono, em relação ao CO_2 pode ser devida tanto à insuficiência de oxigênio em contato com os particulados após a combustão dos gases na sua passagem pela zona de combustão como pela permanência menor dos particulados nesta zona, já que, com o crescimento da massa de amostra, aumenta o tempo de duração das etapas prévias de aquecimento, desvolatilização e combustão dos gases de pirólise. A concentração de oxigênio influi não só nas taxas de reações gás-sólido com o carvão e o char, mas também na reação gás-gás com o CO para gerar CO_2 . Além disso, a temperatura da mistura gasosa na combustão influi no equilíbrio termodinâmico do sistema gasoso $\text{CO} - \text{CO}_2 - \text{O}_2$ (CARPENTER, 2006a). Quanto maior a temperatura, maior será a relação CO/CO_2 no equilíbrio.

Deve-se ainda ressaltar que os resultados se referem ao carvão AV2, com alto teor de matéria volátil, e que a temperatura de pré-aquecimento na zona de mistura era de apenas $650\text{ }^\circ\text{C}$, muito inferior ao valor pretendido no projeto, na faixa de $900 - 1000\text{ }^\circ\text{C}$. Ensaios futuros com temperatura maiores de pré-aquecimento e com carvões com diferentes teores de matéria volátil certamente irão contribuir para um melhor entendimento das causas que influenciam na relação CO/CO_2 .

Outro aspecto a ser comentado é a representatividade da amostra coletada dos gases de combustão. O projeto do simulador e as rotinas programáveis permitiram obter-se amostras dos gases de combustão consideradas representativas pois amostras coletadas antes do filtro de retenção de sólidos e no cilindro amostrador de gases apresentaram concentrações diferentes de CO e CO_2 , mas mantiveram a mesma relação CO/CO_2 . Como o vácuo do cilindro coletor de gases antes do pulso é parcial, existe ali um estoque inicial de gás oxigênio e também uma fração do nitrogênio utilizado no resfriamento e inertização do char é capturada pelo cilindro, os gases de combustão coletados no cilindro tem sua concentração diminuída. O aperfeiçoamento do sistema de coleta de gases está

sendo estudado para permitir tanto a coleta de amostras rápidas na fase transiente, bem para reduzir a diluição da amostra coletada no cilindro amostrador.

Nos altos-fornos, pratica-se a injeção de misturas de carvões cuja composição resulte num teor médio de matéria volátil, a fim de evitar problemas de operação. Teores elevados de matéria volátil podem influir negativamente na formação do char, na velocidade do sopro e na formação de finos de coque na zona de combustão (CARPENTER, 2006b).

Os valores do *burnout* do carvão AV2 apresentados na Figura 19 foram avaliados como descrito na seção 5.2.3. O valor máximo obtido foi de 80%, para 1 g de carvão e 3 bar de oxigênio, ou seja, para a máxima relação O/C testada, indicando que a conversão do carvão é ainda incompleta, possivelmente por limitação do tempo de residência e por temperatura máxima de chama ainda insuficiente. Os valores considerados baixos para a pressão de oxigênio de 2 bar e a redução significativa que ocorre no aumento da massa de carvão AV2 de 1,5 g para 2,0 g foram decisivas na escolha das condições padronizadas para os ensaios comparativos de combustibilidade para diferentes combustíveis: 1,5 g para a massa de amostra e 3 bar para a pressão de oxigênio.

Quanto à influência da massa e da pressão de oxigênio no *burnout*, observou-se que, para uma mesma pressão de oxigênio, o *burnout* diminui com o aumento da massa de amostra, e, para uma mesma massa de amostra, o *burnout* aumenta com a pressão de oxigênio. Como tendência, estes resultados eram esperados, pois se enquadram na tendência geral de aumento do *burnout* com o aumento da relação O/C, já que uma maior concentração de oxigênio aumenta as taxas de reação de combustão do carvão, sejam elas controladas pela cinética química ou pela difusão gasosa (CARPENTER, 2006a).

Os resultados de *burnout* obtidos nos ensaios de combustão dos quatro combustíveis selecionados foram submetidos a uma análise estatística, utilizando-se o software SPSS 24.0, pelo limitado número de resultados disponíveis (MACHADO, 2017). A análise comprovou que seguem uma distribuição normal e que os resultados podem ser expressos pela média e desvio padrão. A Figura 20 apresenta os valores médios e obtidos com os respectivos desvios padrão para os quatro

combustíveis em função do teor de matéria volátil, para pressões de oxigênio de 2 e 3 bar na zona de combustão.

Na análise estatística dos resultados, o coque de petróleo CP apresentou um desvio padrão muito elevado, enquanto que os três carvões AV1, AV2 e BV apresentaram desvios padrão razoáveis para essa fase de testes pré-operacionais.

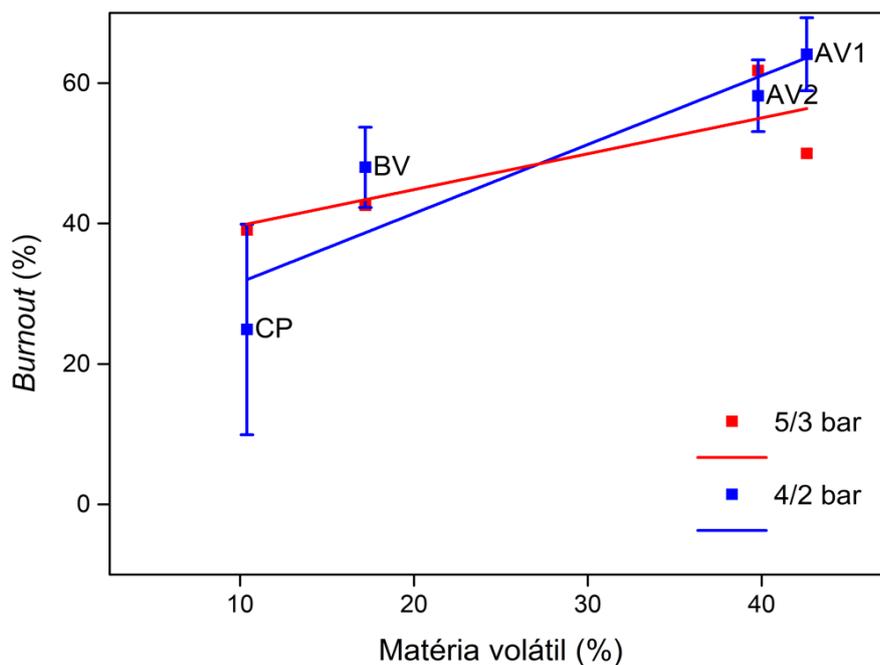


Figura 20: Gráfico do *burnout* em função do teor de matéria volátil para dois conjuntos distintos de pressão.

Fonte: MACHADO *et al.*, 2017.

Na análise estatística dos resultados, o coque de petróleo CP apresentou um desvio padrão muito elevado, enquanto que os três carvões AV1, AV2 e BV apresentaram desvios padrão razoáveis para essa fase de testes pré-operacionais.

O coque de petróleo CP apresenta um teor de cinzas muito baixo (ver Tabela 2, p. 61) comparativamente aos dos três carvões. A equação de cálculo do burnout, baseada exclusivamente no balanço de cinzas antes e depois da combustão, torna-se imprecisa para teores de cinzas muito baixos, pois mínimas variações na determinação analítica do teor de cinzas se refletem nos resultados de *burnout*. Uma alternativa para minimizar o problema é a adição de uma quantidade de cinza artificial inerte para este tipo de combustíveis (YAMAGATA *et al.*, 1992). Outro autor

propõe incluir-se na equação de cálculo do burnout o balanço de massas (De GIROLAMO *et al*, 2017). Essa técnica não é facilmente aplicável aos simuladores atuais, incluindo-se o simulador do LASID, pois para isso seria necessário desenvolver-se sistemas de coleta de char com perda mínima de massa no processo.

Como o burnout considera tanto a conversão da Matéria Volátil, que ocorre mais facilmente, como a do Carbono Fixo, é de se esperar que, em condições de tempo de residência curtos que não permitam uma conversão quase completa do Carbono Fixo, os carvões com Matéria Volátil elevada devam apresentar valores maiores de burnout do que os carvões com Matéria Volátil baixa nas mesmas condições de combustão. Os valores de *burnout* dos carvões AV1 e AV2 para as duas pressões testadas foram significativamente mais elevados do que os do carvão BV e do coque de petróleo CP, comprovando esta expectativa.

Comparando-se os valores de *burnout* dos quatro combustíveis nas duas pressões, observa-se que estes valores crescem com a pressão de oxigênio para o carvão AV2 e para o coque de petróleo CP, o que é de se esperar pelo aumento da relação O/C com o aumento da pressão de oxigênio. Porém, contrariando esta expectativa, os valores de burnout para os carvões AV1 e BV diminuíram com o aumento da pressão de oxigênio. Como uma característica comum a esses dois carvões é apresentarem algum poder aglomerante, indicado pelos valores respectivos de 2,0 e 1,5 para seus índices de inchamento livre – FSI. Uma hipótese a ser estudada para avaliar este fenômeno é que possa ocorrer alguma forma de aglomeração das partículas destes carvões ao passarem pela fase plástica durante a etapa de desvolatilização e que este fenômeno cresça com o aumento da pressão de oxigênio. Uma aglomeração de partículas anterior à etapa de combustão provocaria um aumento aparente da granulometria das partículas, reduzindo a área superficial total exposta à combustão. Para reações gás-sólido, a taxa de reação tende a ser proporcional à área de contato entre os reagentes, logo a aglomeração de partículas levaria a uma redução na taxa de combustão e à conseqüente redução do *burnout*. A equipe do projeto pretende estudar este fenômeno com mais detalhe, através da avaliação da granulometria do char coletado, comparando-a à do carvão

que o gerou, bem como programando testes comparativos com amostras destes carvões previamente desvolatilizados.

A Figura 21 apresenta duas imagens do combustor capturadas durante a filmagem em alta velocidade de um teste de combustão do carvão AV2. Este teste exploratório teve como objetivo investigar as condições de ajuste da filmadora para uma boa captação da imagem, quanto à objetiva, foco e zoom, bem como a relação da qualidade da imagem com a velocidade de filmagem, expressa em quadros capturados por segundo

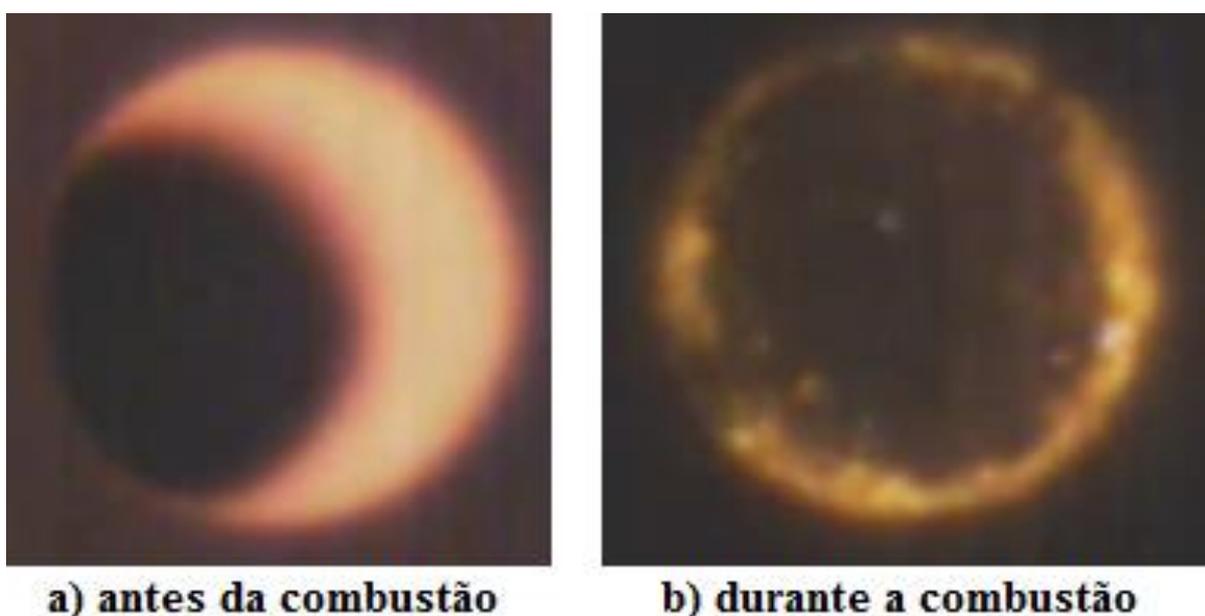


Figura 21: Imagens do combustor de carvão (a) antes da combustão e (b) durante a combustão.

Fonte: MACHADO *et al.*, 2017.

À esquerda, tem-se a imagem do tubo vazio do combustor aquecido a uma temperatura em torno de 1000 °C. A irradiação das paredes produz iluminação suficiente para uma captura da imagem pela filmadora, posicionada verticalmente cerca de 1m acima do início da zona aquecida radiante. O diâmetro da tubulação desde a lente da filmadora até o combustor é de 25 mm e a zona aquecida tem um comprimento de cerca de 60 cm. A leve inclinação do eixo vertical do combustor em relação ao eixo do foco da imagem proporciona a visão parcial da superfície cilíndrica aquecida.

Na imagem da direita, capturada durante o pulso de combustão, observa-se a combustão de partículas de carvão principalmente junto às paredes do tubo. Alguns pontos mais luminosos indicam temperaturas mais elevadas localizadas, possivelmente devido à combustão de gases de pirólise em torno de uma partícula. Como a imagem captura também a zona anterior de transporte de carvão desde a zona de mistura até o ponto de combustão, o fluxo de partículas na zona de aquecimento e pirólise obscurece a imagem da combustão.

Planeja-se ensaios especiais futuros que registrem as imagens do processo de combustão com mais precisão, permitindo acompanhar as etapas sucessivas do processo. Estes testes provavelmente envolverão a definição de faixas estreitas de granulometria, de pulsos muito curtos e de massas reduzidas de combustível, sem e com desvolatilização prévia. Propostas para o simulador

Ao longo dos capítulos 4 e 5, foram apresentadas diversas propostas para melhorar o desempenho do simulador, buscando sanar deficiências ainda existentes na configuração atual. Para continuar a busca de dados experimentais que possibilitem um melhor entendimento dos fenômenos transientes que ocorrem durante a combustão, foram também sugeridos novos testes.

Estas propostas e sugestões já apresentadas e algumas ainda não abordadas serão enfocadas neste capítulo.

5.4 PROPOSTAS PARA MELHORIA DO DESEMPENHO

Estas propostas estão organizadas segundo a sequência de equipamentos e instrumentos apresentada no Capítulo 4. Algumas alterações nas rotinas operacionais vinculadas às modificações do “hardware” do simulador também serão apresentadas, bem como alterações nos valores dos parâmetros programáveis nestas rotinas. A avaliação da equipe de projeto deverá avaliar criticamente a relevância, a conveniência e o custo para a sua eventual implantação.

5.4.1 Propostas para a Zona de Alta Pressão

As propostas para esta zona visam aumentar a eficiência do pulso de injeção e a velocidade de arraste do carvão, para permitir pulsos mais intensos e com menor duração. Para tanto, propõe-se:

- A) A substituição da atual válvula de diafragma VSD65 por uma válvula maior, do mesmo tipo, capaz de uma vazão maior.
- B) O aumento do volume total de armazenagem de gás, possivelmente através da substituição do reservatório cilindro atual por um de maior capacidade.
- C) A modificação dos valores atuais programados na rotina de tiro, aumentando-se a pressão desta zona em 1 a 2 bar e reduzindo-se o tempo de abertura da válvula de forma a se ter uma diferença de pressão importante entre os sensores PI60 e PI65 do início ao fim do pulso.

5.4.2 Propostas para a Zona de Alimentação do Carvão

As propostas para esta zona visam igualmente aumentar a eficiência de arraste do carvão reduzindo o seu comprimento. Para isso, propõe-se:

- A) Redução significativa da distância entre a válvula de retenção VR65 e o ponto de alimentação do carvão de 150 para 50 mm e reposicionamento dos sensores PI65 e TI65 após o ponto de alimentação do carvão.
- B) Redução da distância entre o ponto de alimentação de carvão e o flange de conexão com a zona seguinte por eliminação do resfriador R65 e colocação de um único bocal para conexão em L dos dois sensores PI65 e TI65. Os valores da temperatura TI 65 durante os testes de combustão mostraram que não há aquecimento importante nesta zona que possa afetar a amostra de carvão, possivelmente por não ser o ácido inoxidável um bom condutor de calor, por estar o gás armazenado nesta região antes do pulso estagnado, sem transporte convectivo horizontal significativo e por o flange que separa essa zona da zona seguinte pré-aquecida atuar como dissipador de calor.

5.4.3 Propostas para a Zona de Pré-Aquecimento e Mistura

Os objetivos das melhorias propostas para esta zona visam obter uma maior eficiência de aquecimento dos gases oxidantes dentro do pré-aquecedor, um transporte mais eficiente dos gases pré-aquecidos até a região de mistura com o carvão e uma redução do volume do gás não contido nas partes aquecidas diretamente dentro dos fornos de pré-aquecimento e de combustão. Estas propostas são expostas a seguir:

- A) Utilização de recheio metálico ou cerâmico para multiplicar a área de contato sólido – gás dentro do tubo de pré-aquecimento e, com isso, aumentar significativamente a taxa de transferência de calor para o gás e também obter um perfil mais homogêneo de temperaturas em todo o volume de pré-aquecimento.
- B) Substituição do conjunto atual de forno Jung + mufla Sanchis por um forno único, o que deverá contribuir para uma maior eficiência de aquecimento do gás e um novo desenho de menor volume para a região de mistura.
- C) Desenho e instalação de um sistema que possibilite a entrada de um pulso de gás através do sistema de pré-aquecimento durante o teste de combustão, quase concomitante com o pulso de injeção de combustível, para promover uma maior velocidade de escoamento dos gases pré-aquecidos até a zona de mistura.
- D) Adequação das rotinas do teste de combustão para criar-se um fluxo de gás pré-aquecido durante os ensaios controlado pelos dados da pressão PI50.
- E) Adequação do sistema de aquisição de dados para opção de registro dos dados da pressão PI50 no sistema de aquisição rápida de dados durante o pulso.
- F) Novo desenho da região de mistura, reduzindo os comprimentos das tubulações de entrada do carvão arrastado por gás frio, de ligação do ponto de mistura com a entrada do combustor e de ligação da conexão de entrada do termopar vertical com o ponto de mistura.

5.4.4 Propostas para a Zona de Combustão e Coleta de Char

As melhorias propostas para esta zona têm por objetivos reduzir a possibilidade de vazamentos nas conexões de entrada e saída do reator de combustão, reduzir a perda de carga no sistema de captação do char e ainda tornar mais eficiente o sistema de refrigeração e inertização do char coletado.

Os vazamentos ocorrem especialmente na conexão tronco-cônica, do tipo ponta e bolsa, na entrada do reator em testes com reator de aço, causados pelo processo de dilatação e contração do reator durante seu aquecimento até a condição de combustão e resfriamento até a temperatura ambiente no final da jornada. Este efeito é minimizado com o uso de reatores de alumina, por terem baixo coeficiente de dilatação térmica.

As pastilhas de bronze sinterizado de 3 mm de espessura com porosidade de 40 μm utilizadas para reter o char arrastado com os gases de combustão apresentam perda de carga para as velocidades de escoamento desejadas. O conseqüente aumento do tempo de retenção dos gases de combustão gerados dificulta sobremaneira a definição do tempo de início e da duração do período de coleta de gases. Com isto ocorre maior imprecisão na representatividade da amostra de gases coletada, ocasionando uma maior variação nos resultados analíticos de composição dos gases.

Em testes com utilização de filtro de papel sobre o filtro de bronze, observou-se pontos de combustão do papel provavelmente causados pelo impacto de partículas de char ainda aquecidas. Dependendo do tempo de exposição das partículas de char ao oxigênio remanescente durante a etapa final do pulso, o char ainda aquecido poderá continuar reagindo, formando CO e CO₂. Estas reações posteriores ao processo de combustão poderão influir significativamente ou não tanto nos resultados de burnout como nos da relação CO/CO₂ de avaliação da combustibilidade.

As propostas de melhorias para esta zona são as seguintes:

A) Avaliação do desempenho de adesivos cerâmicos de alta temperatura na melhoria da estanqueidade nas conexões de entrada e saída do combustor em comparação com o sistema de vedação atual, com fitas de teflon grafitado.

B) Aperfeiçoamento do sistema atual de compressão das conexões do combustor constituído por molas de tensão e tensionadores de ajuste.

C) Aperfeiçoamento do sistema de alinhamento vertical do reator em relação às conexões, já que mínimos desvios entre os eixos das conexões macho-fêmea diminui a área de contato entre elas.

D) Desenvolvimento de sistema de coleta eficiente do char com baixa perda de carga, com uso de camadas de lã de rocha suportadas em tela de aço ou de outros materiais de filtragem.

E) Desenvolvimento de um sistema de controle da vazão e da pressão do nitrogênio de resfriamento e inertização.

F) Adequação da rotina operacional com uma variante que possibilite o controle da pressão e da vazão do nitrogênio de inertização do char de forma a viabilizar o resfriamento do char controlado do char concomitantemente com a coleta do gás de combustão.

G) Avaliação do uso de nitrogênio gasoso de baixa temperatura obtido por vaporização de nitrogênio líquido no sistema de resfriamento de char.

5.4.5 Propostas para a Zona de Coleta dos Gases de Combustão

Para esta zona, as melhorias propostas visam aumentar a concentração dos gases de combustão no cilindro coletor de gases. Isto permitiria uma análise mais precisa dos componentes CH_4 e H_2 presentes em baixas concentrações, de difícil detecção nos níveis atuais dos gases de combustão. São elas:

- A) Redução do volume do cilindro coletor de gases para possibilitar o processo de coleta de gases de combustão com alto vácuo no cilindro, evitando a diluição dos gases de combustão coletados com o estoque de gás oxidante pré-existente.
- B) Desenvolvimento de técnica de retirada de alíquota de gás coletado no cilindro viável para pressões menores inferiores à atmosférica.
- C) Adequação do sistema de aquisição rápida de dados para alternativa de coleta e registro de dados da pressão IP80 da zona de coleta de gases durante o teste de combustão. Isto possibilitará avaliar-se o diferencial

instantâneo de pressão entre a zona de combustão e a zona de coleta de gases

5.5 Propostas de Testes Experimentais

O simulador de PCI do LASID foi desenvolvido para servir a dois propósitos:

- Estudos acadêmicos de investigação dos parâmetros que influem na combustibilidade dos carvões minerais e de outros combustíveis sólidos particulados e dos fenômenos transientes que ocorrem durante o processo de combustão;
- Desenvolvimento de metodologia padronizada de avaliação comparativa da combustibilidade de carvões par PCI, aplicável a este simulador.

Os testes pré-operacionais buscarem atender estes dois objetivos. A prioridade dos testes sumariamente listados a seguir na fase operacional que se inicia depende das demandas acadêmicas e empresariais e da disponibilidade de recursos humanos e financeiros. Alguns dependem da implantação de algumas das melhorias sugeridas na seção anterior e outros poderão ser realizados com a configuração atual do simulador.

Os testes sugeridos estão arrolados a seguir:

- A) Testes de eficiência do arraste de carvão com pulsos muito curtos e com elevada diferença de pressão entre as duas zonas.
- B) Testes de avaliação da evolução das pressões IP50 e IP80 durante a combustão, processando seus dados através do sistema de aquisição rápida de dados.
- C) Testes de combustão com combustíveis previamente desvolatilizados, em temperaturas, para melhor discriminação das etapas sequencias de combustão
- D) Testes com carvões de diferentes *ranks* e diferentes teores de voláteis.
- E) Testes de determinação do ponto de início da combustão e da temperatura máxima de chama utilizando os termopares especiais importados.
- F) Testes com misturas de combustíveis
- G) Testes com sistemas de filtração de baixa perda de carga

- H) Testes de avaliação da eficiência dos recheios no pré-aquecimento dos gases.
- I) Testes especiais com filmagem rápida para determinação do tempo de residência no combustor.

6 CONCLUSÕES

Os resultados dos testes pré-operacionais comprovam que o desenvolvimento do simulador de PCI do LASID pode ser considerado, até o momento, um projeto com elevado grau de sucesso. Demonstram que ele é uma ferramenta eficaz para avaliar o comportamento de carvões e outros combustíveis sólidos pulverizados com vistas ao seu uso em processos de injeção em altos-fornos siderúrgicos, em condições próximas das que ocorrem nas ventaneiras e na região de combustão dos altos-fornos.

As premissas estabelecidas para o projeto estão sendo atendidas (ver Capítulo 2), algumas das quais são listadas a seguir:

- Versatilidade quanto aos combustíveis sólidos a serem testados: carvões minerais de diferentes características, coque de petróleo e carvão vegetal.

- Flexibilidade quanto a execução de ensaios de combustão e pirólise, através de diversas rotinas automatizadas facilmente programáveis quanto aos parâmetros de operação.

- Capacidade de aquisição de dados em alta velocidade, que possibilitam acompanhar a evolução de temperaturas e pressões durante o curto tempo de residência das partículas de combustível na zona de combustão, da ordem de centésimos de segundo;

- Simplicidade operacional, adequado para os recursos humanos em formação, transitórios, característicos dos laboratórios acadêmicos.

- Custo operacional baixo, compatível com os recursos geralmente limitados disponíveis para projetos de pesquisa acadêmica.

O cronograma inicial de execução teve que ser reajustado algumas vezes ao longo do andamento do projeto. Nas etapas de aquisição dos equipamentos, de construção e de montagem do simulador, houve algum atraso devido principalmente aos prazos dilatados de fornecimento de equipamentos e instrumentos, especialmente aqueles dependentes de importação.

Todavia, foi a etapa de pré-operação e de ajustes operacionais a principal responsável pelo atraso geral do projeto. Prevista para ser executada em seis meses, acabou por estender-se por mais de dois anos, do primeiro semestre de 2015 até o segundo semestre de 2017. A partir dos primeiros resultados dos testes

pré-operacionais, foram identificadas alterações necessárias nas diversas zonas do simulador, já abordadas ao longo desta tese, relativas a redimensionamento de algumas partes, inclusão de novos equipamentos como a mufla e a fita de aquecimento, e troca de instrumentos de controle. As versões iniciais das rotinas de controle passaram igualmente por diversas adequações necessárias para melhorar a qualidade de execução dos ensaios e dos resultados obtidos.

Outro fator de atraso do cronograma foram as paradas prolongadas relacionadas a acidentes operacionais, dos quais o mais importante foi a ruptura explosiva do reator de alumina que danificou as resistências de aquecimento do forno Carbolite. O processo de importação das novas resistências de reposição ocasionou uma interrupção de alguns meses na continuidade dos testes pré-operacionais

Os resultados dos testes pré-operacionais apresentados no Capítulo 5 comprovam o bom funcionamento do simulador como um todo e, em especial, do sistema automático programável de controle e do sistema de aquisição de dados em alta velocidade. A captura eficiente dos dados de temperatura e pressão e a estabilidade do andamento dos ensaios ficou evidenciada na boa repetibilidade dos resultados dos perfis de temperatura e pressão nos ensaios realizados, no mínimo em triplicata, para diferentes condições operacionais.

Os resultados obtidos para os ensaios de combustão com diferentes combustíveis, para diferentes massas de combustível e para diferentes pressões do oxigênio, demonstraram a capacidade do simulador em produzir dados de boa qualidade, que possibilitam avaliar a influência destes parâmetros operacionais nas variáveis de resposta analisadas: valores e perfis de variação das pressões e temperaturas durante a combustão, valores de *burnout* e a composição dos gases de combustão. O teste exploratório de filmagem demonstrou ainda a capacidade do simulador de fornecer imagens de boa qualidade em alta velocidade para acompanhamento dos fenômenos que ocorrem durante a combustão.

Sob o ponto de vista quantitativo, os valores de *burnout* e de composição dos gases de combustão obtidos nos resultados experimentais estão ainda inferiores aos esperados, mormente para os combustíveis com menor teor de voláteis. Isto indica que há ainda uma conversão insuficiente do carbono fixo do char após a queima dos

gases de pirólise, algo inferior à que ocorre nos altos-fornos. A causa mais provável é a temperatura relativamente baixa de pré-aquecimento dos gases oxidantes que, por diminuírem a velocidade com que ocorrem os processos sucessivos de aquecimento, desvolatilização, combustão dos gases e combustão do char, possivelmente atrasam o início da etapa de combustão de char, reduzindo sua conversão durante o curto tempo de residência das partículas de combustível dentro do combustor. Outro fator que contribui é o uso de amostras com prévia remoção de finos, que tendem a apresentar taxas mais elevadas para todas as etapas do processo de combustão. Vale lembrar que a conversão do carbono fixo do char também é incompleta nos processos de PCI nos altos-fornos siderúrgicos (CARPENTER, 2006a).

Outro aspecto a considerar é a avaliação da similaridade entre as condições reinantes na combustão nas ventaneiras e zona de combustão dos altos-fornos e as que ocorrem nos testes de combustão no simulador do LASID.

Como o comprimento da zona de combustão do alto-forno é da ordem de 1,5 a 2 m e os tempos de residência do combustível nesta zona estão na faixa de 40 a 50 ms, a concepção do simulador do LASID, à semelhança dos demais simuladores tipo Aachen, busca obter tempos de residência similares em distâncias de 30 a 60 cm, típicas de suas zonas de combustão. Para isso, adotam-se velocidades menores de arraste do combustível. Os dados atuais já obtidos não permitem avaliar-se com exatidão o tempo de residência do combustível na zona de combustão. Porém os dados de evolução dos perfis de temperatura na zona de mistura (ver seção 5.3.2.2) permitem intuir que este tempo deve ser inferior a 200 ms. Testes especiais de filmagem da combustão em alta velocidade, sugeridos no Capítulo 6, permitirão uma avaliação mais precisa do tempo de residência.

Quanto à granulometria de partículas, adotou-se um limite superior de 76 μm , similar ao dos altos-fornos, porém optou-se pela eliminação dos finos abaixo de 38 μm para evitar a superposição nos gráficos de P e T dos efeitos da combustão dos ultrafinos, dificultando a identificação e análise das etapas sucessivas do processo de combustão.

As pressões testadas dos gases se situaram na faixa de 2 a 3,3 bar absolutos, resultando em pressões após a combustão dos gases de ordem de 3 a

4,5 bar durante a etapa de combustão do char. Estas pressões são similares às que ocorrem na zona de combustão dos altos-fornos.

Na fase de testes pré-operacionais, adotou-se como gás oxidante o oxigênio puro, seguindo o que se pratica em outros simuladores tipo Aachen. Nos altos-fornos, utiliza-se ar enriquecido, geralmente na faixa de 25 a 28%, como gás oxidante. Um dos principais motivos é a necessidade de reduzir a velocidade de passagem do gás oxidante com o combustível particulado em suspensão pela zona de combustão para se obter tempos de residência similares, sem reduzir a relação O/C adequada para se obter a eficiência de conversão e a composição de gases de combustão desejadas. Na continuidade dos estudos de combustão estão previstos testes de combustão com misturas oxigênio – nitrogênio de diversas concentrações.

Nesta fase de testes pré-operacionais não se mediram as temperaturas de chama na zona de combustão, assim não se pode assegurar quão distantes elas estão das alcançadas na zona de combustão dos altos-fornos, em torno de 2.000 °C. Apesar da utilização de oxigênio puro, que favorece o aumento da temperatura de chama, a temperatura bastante inferior de pré-aquecimento dos gases deve provocar uma redução significativa neste valor. Considerando-se os picos de temperatura obtidos nos ensaios em ponto afastado da região de combustão dos gases, pode-se inferir que ela é suficientemente elevada para permitir uma taxa rápida de combustão e de geração de calor. Valores mais precisos poderão ser obtidos com testes específicos para este fim, com medição direta da temperatura na região de combustão, empregando-se os termopares tipo B e tipo C importados.

Já se definiu uma metodologia básica de realização dos testes de combustão para esta fase de testes pré-operacionais que forneceram os resultados apresentados no capítulo 5. Atualmente, a equipe busca aperfeiçoar esta metodologia para aumentar a qualidade de obtenção dos dados de composição dos gases de combustão especialmente no que se refere à coleta representativa da amostra de gases. Com isso, a avaliação comparativa da combustibilidade de diferentes combustíveis através dos valores da relação CO/CO₂ ganhará em precisão e confiabilidade.

Conclui-se finalmente que o simulador de PCI desenvolvido pelo LASID é uma ferramenta de grande utilidade tanto para o desenvolvimento de estudos

acadêmicos de combustão de combustíveis sólidos particulados, em especial, dos fenômenos transientes que ocorrem durante o processo de combustão. Atende assim ao objetivo principal estabelecido no seu projeto de desenvolvimento. Muitas teses e dissertações poderão utilizá-lo para estudar a combustão de particulado através de diversas abordagens, e com diferentes enfoques.

Vale ainda ressaltar seu potencial na prestação de serviços às indústrias siderúrgicas e carboníferas brasileiras na investigação da adequação de diferentes combustíveis para utilização em processos de injeção em altos-fornos isoladamente ou em misturas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVAREZ, D.; BORREGO, A. G.; MENÉNDEZ, R. **Unbiased methods for the morphological description of char structures.** *Fuel*, v. 76, n. 13, p. 1241-1248, 1997.

ARIYAMA, T.; SATO, M.; YAMAKAWA, Y.; YAMADA, Y.; SUZUKI, M. **Combustion behaviour of pulverized coal in tuyere zone of blast furnace and influence of injection lance arrangement on combustibility.** *ISIJ International*, v. 34, n. 6, pp. 476–483, 1994.

ARIYAMA, T. Combustion behavior of PC particle group. In: ISHII, K. **Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation.** 1. ed. Oxford, UK: Pergamon – Elsevier Science, 2000. cap. 3, p. 37-62.

ASSIS, P. S.; MARTINS, W. B.; VIEIRA, C. B. **Avanços na injeção de carvão pulverizado para sua aplicação em altos-fornos.** *Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 4, p. 281-285, 2003.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ATKINSON, C. J.; WILLMERS, R. R. **Blast furnace coal injection studies using a tuyere raceway investigation rig.** *Fuel Processing Technology*, v. 24, p. 107-115, 1990.

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.

BEAMISH, B. B., SHAW, K. J., RODGERS, K. A., NEWMAN, J. **Thermogravimetric determination of the carbon dioxide reactivity of char from some New Zealand coals and its association with the inorganic geochemistry of the parent coal.** Fuel Processing Technology, v. 53, p. 243-253, 1998.

BARBIERI, C. C. T., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. **Combustibility and reactivity of coal blends and charcoal fines aiming use in ironmaking.** Materials Research. 19(3): p. 594-601, 2016.

BARBIERI, C. C. T., MACHADO, A. S., RECH, R. L., POHLMANN, J. G., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. **O Simulador da zona de combustão do alto-forno do Laboratório de Siderurgia da UFRGS - uma nova ferramenta na seleção de carvões para injeção.** Anais do V CBCM – Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Criciúma, 2017.

BARBIERI, C. C. T. **Estudos de misturas de carvões e biomassa visando a combustão em alto-forno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BARBIERI, C. C. T. **Avaliação da combustibilidade de carvão brasileiro para injeção em altos-fornos em simulador de PCI e em termobalança.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BORTZ, S. **Coal injection into the blast furnace.** Luxembourg Commission of the European Communities, 1983. 104 p. Contract No 7210.AA/601.

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

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.

CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P. **Efeitos da injeção de carvão pulverizado nas condições operacionais do alto-forno**. 53º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, p. 2004-2018, 1998.

DAHLSTEDT, A.; HALLIN, M.; WIKSTRÖM, J. **Effect of raw material on blast furnace performance: the use of an experimental blast furnace**. 4th European Coke and Ironmaking Congress Proceeding, 2000, v. 1, p 138-145, 2000

De GIROLAMO, A., LAMEU, N.K., ZHANG, L., NINOMIYA, Y. **Ignitability and combustibility of Yallourn pyrolysis char under simulated blast furnace conditions**. Fuel Processing Technology. 2017; 156: 113–23.

DENO, T.; OKUNO, Y. Introduction – High rate PCI operation in Japan. In: **Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation**. 1. ed. Oxford, UK: Pergamon – Elsevier Science, 2000. Cap. 1, p. 1-14.

FOGLER, H.S., **Elements of Chemical Reaction Engineering**, cap. 10, 1992, Prentice Hall, New Jersey

GHIGGI, M. L. F., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. **Estudo da reatividade de carvão do Faxinal e coque de petróleo para uso em PCI**. 36º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Ouro Preto, 2006.

GHIGGI, M. L. F.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F.; KALKREUTH, W.; ALVAREZ, D.; BORREGO, A. G. **Estudo da combustão de misturas com carvão Faxinal por TGA e microscopia ótica.** 37° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Salvador, 2007.

GOMES, M. L. I., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F., KALKREUTH, WOLFGANG. **Avaliação das propriedades de misturas de carvões gaúchos e importados para PCI.** 33° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Ouro Preto – MG, p. 98-107, 2003.

GOMES, M. L. I., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. **Thermal analysis evaluation of the reactivity of coal mixtures for injection in the blast furnace.** Materials Research, v. 9, p. 91-95, 2006.

GUDENAU, H. W.; SENK, D.; FUKADA, K.; BABICH, A.; FROEHLING, C., GARCÍA, L. L.; FORMOSO, A.; ALGUACIL, F. J.; CORES, A. **Coke, char and organic waste behaviour in the blast furnace with high injection rate.** Revista de Metalurgia, v. 39, p. 367-377, 2003.

GUO, B.; ZULLI, P.; ROGERS, H.; MATHIESON, J. G.; YU, A. **Three-dimensional simulation of flow and combustion for pulverized coal injection.** ISIJ International, v. 45, n. 9, p. 1272–1281, 2005.

HUTNY, W. P., LEE, G. K., PRICE, J. T. **Fundamentals of coal combustion during injection into a blast furnace.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 17, p.373-395, 1991.

HUTNY, W. P., GIROUX, L., MACPHEE, J. A., PRICE, J. T. **Quality of coal for blast furnace injection.** In: Blast Furnace Injection Symposium Proceedings, p. 1-31, Cleveland, Ohio, 1996.

ICCP, **International Committee for Coal Petrology**. 2nd Edition, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France.1963.

KALKREUTH, W., BORREGO, A. G., ALVAREZ, D., MENENDEZ, R., OSÓRIO, E., RIBAS, M., VILELA, A., ALVES, T. C. **Exploring the possibilities of using Brazilian subbituminous coals for blast furnace pulverized fuel injection**. Fuel, v. 84, p.763-772, 2005.

KALKREUTH, W.; LUNKES, K. M.; OLIVEIRA, J.; GHIGGI, M. L.; OSÓRIO, E.; SOUZA, K.; SAMPAIO, C. H.; HIDALGO, G. **The lower and upper coal seams of the Candiota Coalfield, Brazil — Geological setting petrological and chemical characterization, and studies on reactivity and beneficiation related to their combustion potential**. International Journal of Coal Geology, v. 111, p. 53-66, 2013.

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.

LE MANQUAIS, K.; SNAPE, C.; MCROBBIE, I.; BARKER, J.; PELLEGRINI, V. **Comparison of the combustion reactivity of TGA and drop tube furnace chars from a bituminous coal**. Energy & Fuels, v. 23, p. 4269-4277, 2009.

LI, H.; ELLIOTT, L.; ROGERS, H.; AUSTIN, P.; JIN, Y.; WALL, T. **Reactivity study of two coal chars produced in a drop-tube furnace and a pulverized coal injection rig**. Energy & Fuels, v. 26, p. 4690-4695, 2012.

LI, H.; ELLIOTT, L.; ROGERS, H.; AUSTIN, P.; JIN, Y.; WALL, T. **Coal burnout in a pilot-scale rig simulating pulverized coal injection and a laboratory drop tube furnace**. 10th Australian Coal Science Conference, Brisbane, 2013.

LI, H.; ELLIOTT, L.; ROGERS, H.; AUSTIN, P.; JIN, Y.; WALL, T. **Comparative study on the combustion performance of coals on a pilot-scale test rig simulating blast furnace pulverized coal injection and a lab-scale drop-tube furnace.** Energy & Fuels, v. 28, p. 363-368, 2014.

LU, L.; SAHAJWALLA, V.; HARRIS, D. **Characteristics of chars prepared from various pulverized coals at different temperatures using drop-tube furnace.** Energy & Fuels, v. 14, p. 869-876, 2000.

LU, L.; SAHAJWALLA, V.; KONG, C.; MCLEAN, A. **Chemical structure of chars prepared under conditions prevailing in the blast furnace PCI operation.** ISIJ International, v. 42, n. 8, p. 816-825, 2002.

MACHADO, F. S.; **Aproveitamento energético de finos de carvão em alto-forno, visando redução de emissões e obtenção de créditos de carbono.** Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

MACHADO, J., POHLMANN, J., OSÓRIO, E., VILELA, A., BABICH, A., SENK, D., GUDENAU, H.-W. **Consumption of coal and charcoal by secondary reactions at their injection into blast furnaces.** 3rd International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore, São Luís, p. 803-814, 2008.

MACHADO, J. G. M. S. **Estudo da reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MACHADO, J. G. M. S., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. **Reactivity of Brazilian coal, charcoal, imported coal and blends aiming to their injection into blast furnaces.** Materials Research, v. 13, n. 3, p. 287-292, 2010.

MACHADO, A. S.; RECH, R. L.; MACHADO, J.G.M. S.; VILELA, A.C.F.; OSÓRIO, E. **Construção de um simulador da zona de combustão do alto-forno para a avaliação de combustíveis sólidos e líquidos.** In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, p. 304-318, Gramado, 2013.

MACHADO, A. S. **Automação de um simulador de combustão para avaliação dos fenômenos transientes durante a desvolatilização e combustão de carvões para injeção em altos-fornos.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACHADO, A. S., RECH, R. L., BARBIERI, C.C.T., POHLMANN, J. G., MACHADO, J. G. M. S., BAGATINI, M. C., MARCILIO, N. R., PERES, A. E. C., VILELA, A. C. F., OSORIO, E., **Design and construction of a PCI rig for evaluation of pulverized fuels: equipment features.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, Associação Brasileira de Metalurgia, Belo Horizonte (submetido).

MATSUZAKI, S.; ICHIDA, M.; SUGIYAMA, T.; YAMAGUCHI, K.; DENO, T. **Behaviour of fines and coal combustibility with high rate pulverized coal injection in blast furnace.** La Revue de Métallurgie - CIT, mars 1998, p. 359-368, 1998.

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.

OLIVEIRA, M. A.; CARVALHO, K. M. G.; ASSIS, P. S. **Aspectos relativos à distribuição de carga e à combustão do redutor, considerando a n de carvão pulverizado em altos-fornos.** 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, p. 383-402, 1996.

OSÓRIO, E.; GOMES, M. L. I.; VILELA, A. C. F.; KALKREUTH, W.; BORREGO, A. G.; ALVAREZ, D. **Evaluation of combustion and properties of South Brazilian coal and high rank coals for use in PCI.** In: 2nd International Meeting on Ironmaking Proceedings, Vitória, p. 169-179, 2004

OSÓRIO, E., GOMES, M. L. I., VILELA, A. C. F., KALKREUTH, W., ALMEIDA, M. A. A., BORREGO, A. G., ALVAREZ, D. **Evaluation of petrology and reactivity of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI).** International Journal of Coal Geology, v. 68, p. 14-29, 2006.

OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F., SAMPAIO, C. H. **Nota Técnica – Carvão e coque. Estudo prospectivo do setor siderúrgico.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

PIPATMANOMAI, S.; PATERSON, N.; DUGWELL, D. R.; KANDIYOTI, R. **Investigation of coal conversion under conditions simulating the raceway of a blast furnace using a pulsed air injection, wire-mesh reactor.** Energy & Fuels, v. 17, p. 489-497, 2003.

POHLMANN, J. G.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F.; BORREGO, A. G.; DIEZ, M. A. **Avaliação da combustibilidade e reatividade ao CO₂ de chars de carvão brasileiro e importados obtidos em atmosfera convencional e de oxidação.** III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Gramado, 2011.

POHLMANN, J.G., OSÓRIO, E., VILELA, A.C.F., DIEZ, M.A., BORREGO, A.G. **Pulverized combustion under conventional (O₂/N₂) and oxy-fuel (O₂/CO₂) conditions of biomasses treated at different temperatures.** Fuel Processing Technology. 2017. v. 155, p. 174–82, 2017

RECH, R. L.; MACHADO, A. S.; BARBIERI, C. C. T.; MACHADO, J. G. M. S.; VILELA, A. C. F.; OSÓRIO, E. **Desenvolvimento de equipamento de laboratório**

para simular PCI em altos-fornos. 44° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas da ABM, Belo Horizonte, 2014.

REDIVO, R. V. **Caracterização tecnológica do carvão das camadas Barro Branco e Bonito para fins energéticos na região de Criciúma** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2002.

REIS, H. M. B. **Estudo da combustão de misturas de carvões de baixo e alto ranks.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

ROGERS, H.; MATHIESON, J. G.; MASON, M. B. **The impact of coal petrographic composition on the combustion of pulverized coals under simulated blast furnace tuyere injection conditions.** CHEMECA Proceedings, 2011.

RUBIERA, F., ARENILLAS, A., PEVIDA, C., GARCÍA, R., PIS, J. J., STEEL, K. M., PATRICK, J. W. **Coal structure and reactivity changes induced by chemical demineralization.** Fuel Processing Technology, v.79, p. 273-279, 2002.

SHEN, Y. S.; GUO, B. Y.; YU, A. B.; ZULLI, P. **A three-dimensional numerical study of the combustion of coal blends in blast furnace.** Fuel, v. 88, p. 255-263, 2009.

SMOOT, L. D., SMITH, P. J. **Heterogeneous char reaction processes.** In: **Coal combustion and gasification.** New York: Plenum Press, 1985. Cap.4, p. 77-108.

SUZUKI, T.; HIROSE, R.; MORIMOTO, K.; ABE, T. **High intensity combustion of coal for application to a blast furnace.** In: Twentieth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Pittsburgh, p. 1419-1425, 1984.

SUZUKI, T.; UEHARA, T.; AKEDO, H. **Combustion characteristics of pulverized coal for blast furnace coal injection.** Ironmaking Conference Proceedings, 1990, p. 465-471.

UENO, H.; YAMAGUCHI, K.; TAMURA, K. **Coal combustion in the raceway and tuyere of a blast furnace.** ISIJ International, v. 33, n. 6, p. 640–645, 1993.

ULHÔA, M. B.; NORA, S. C. L. **Introdução à petrografia do carvão.** Em: Carvão Metalúrgico para Siderurgia. ABM. Parte I, p. 229 -278, 1991.

UNSWORTH, J. F.; BARRATT, D. J.; ROBERTS, P. T. **Coal quality and combustion performance: an international perspective.** v. 19. Amsterdam: Elsevier, 1991.

VAMVUKA, D.; SCHWANNEKAMP, G.; GUDENAU, H. W. **Combustion of pulverized coal with additives under conditions simulating blast furnace injection.** Fuel, v. 75, p. 1145-1150, 1996.

YAMAGATA, C.; SUYAMA, S. HORISAKA, S.; TAKATANI, K. KAJIWARA, Y.; KOMATSU, S.; SHIBUTA, H.; AMINAGA, Y. **Fundamental study on combustion of pulverized coal injected into coke bed at high rate.** ISIJ International, v. 32, n. 6, p. 725–732, 1992.

WU, T.; CLOKE, M.; BARRANCO, R.; LESTER, E. **The relationship between char morphology and its parental coal properties.** In: 12th International Conference on Coal Science. Cairns, 2003.

WU, L.; PATERSON, N.; DUGWELL, D. R.; KANDIYOTI, R. **Simulation of blast-furnace tuyere and raceway conditions in a wire mesh reactor - extents of combustion and gasification.** Energy & Fuels, v.21, p. 2325-2334, 2007.

WU, Z. **Fundamentals of pulverized coal combustion**. CCC/95, London, UK, IEA Clean Coal Centre, 2005, 36 p.