

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

FLAVIO MICHELS BIANCHI

**ESTUDO DA COQUEIMA DE CARVÃO MINERAL BRASILEIRO E BIOMASSA
UTILIZANDO LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE EM ESCALA DE BANCADA**

**SÃO LEOPOLDO
2018**

Flavio Michels Bianchi

**Estudo da coqueima de carvão mineral brasileiro e biomassa utilizando leito fluidizado
borbulhante em escala de bancada**

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Prof. Dr. Flavia Schwarz Franceschini Zinani
Prof. Dr. Gabriel Meneghetti Faé Gomes

SÃO LEOPOLDO
2018

B577e BIANCHI, Flavio Michels
Estudo da coqueima de carvão mineral
brasileiro e biomassa utilizando leito fluidizado
borbulhante em escala de bancada / Flavio Michels
BIANCHI. -- 2018. 71 f.
Orientador: Paulo Roberto Wander.
71f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade do Vale dos
Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São
Leopoldo, RS, 2018.

1. Combustão. 2. Biomassa. 3. Carvão
Mineral. 4. Leito Fluidizado Borbulhante. 5.
Coqueima. I. Wander, Paulo Roberto, orient. II.
Título.

CDD 662.622

RESUMO

Baseado na tecnologia de leito fluidizado borbulhante, um combustor em escala de bancada foi utilizado para conduzir trabalho de pesquisa em coqueima de misturas de carvão mineral e biomassa (serragem). O carvão mineral presente no sul do Brasil é na sua maioria do tipo sub-betuminoso e é beneficiado para alcançar requisitos típicos das usinas termelétricas localizadas no sul do Brasil. Tem aproximadamente 40% de cinzas e uma substancial quantidade de enxofre (aproximadamente 2%). A umidade é um componente comum nas biomassas e que pode dificultar a combustão da biomassa pura exigindo ajustes operacionais. Além disso, o percentual de umidade normalmente sugere poderes caloríficos menores quando comparados com o carvão. Verificando algumas características destes combustíveis a queima combinada aparece como possibilidade de minimizar problemas associados a queima singular destes combustíveis. A proposta deste trabalho foi de determinar a melhor proporção de mistura para a operação de coqueima, misturando carvão mineral e biomassa de madeira em um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada. Resultados experimentais sugerem que misturas de combustível contendo até 10% de biomassa oferecem melhores resultados em termos de emissões e controle da estabilidade das temperaturas. Também foi pretendido avaliar o impacto das emissões nos gases de exaustão quando comparado com a queima simples de carvão mineral em leito fluidizado borbulhante. O estudo apresentou boa eficiência de combustão para os casos considerados, incluindo baixas emissões de CO e alcatrões. As emissões de SO₂ não foram afetadas pela presença da biomassa. Ademais, o regime de fluidização de 6 umf e o excesso de ar de 70% foram estimados como mais assertivos para a operação baseados no desempenho e temperatura dos gases de exaustão.

Palavras-chave: Combustão. Leito Fluidizado Borbulhante. Coqueima. Carvão Mineral. Biomassa.

ABSTRACT

Based on bubbling fluidized bed technology, a bench scale combustor was used to conduct research works in co-firing of coal and biomass (wood shavings) blends. South Brazilian subbituminous coal, beneficiated to achieve typical thermal power plant requirements located in south Brazil. Still have about 40% of ash content and a substantial amount of sulfur (around 2%). Related to some processes including an environmentally friendly concept of combustion, but not giving up the reliability of coal in terms of supply and storage, a co-firing of coal together with biomass agrees with these interests. Biomass wood shavings in the south of Brazil are cheap, easy to find and an obviously renewable source of energetic fuel. Nevertheless, this kind of biomass is rich in moisture. The moisture is a usual component of biomasses, which may hinder the combustion of biomass alone requiring operational adjustments. Furthermore, the percentage of moisture normally suggests lower heating values when compared to coal. Characteristics of these fuels indicate that cofiring can minimize problems associated with the single burning of these fuels. The purpose of this work was to determine the best blend proportion of operation for co-firing, mixing coal and wood shavings in a bubbling fluidized bed bench scale combustor. Experimental results suggest that fuel blends containing up to 10% biomass provide better results in terms of emissions and temperature control. It was also intended to evaluate the impact on flue gas emissions when compared with just coal burning in a bubbling fluidized bed. The study presented good combustion efficiency for the considered cases, including low emissions of CO and tars. SO₂ emissions were not affected by the presence of biomass. In addition, the fluidization regime of 6 umf and the excess air of 70% were estimated as more assertive for the operation based on the performance and temperature of the exhaust gases.

Key-words: Combustion. Bubbling Fluidized Bed. Cofiring. Coal. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama da classificação de Geldart (adaptado de Oka, 2004)	16
Figura 2.2 - Regimes de fluidização: a – leito fixo, b – mínima fluidização, c – fluidização borbulhante, d – <i>slugging</i> , e – fluidização turbulenta, f – fluidização rápida, g - transporte pneumático (adaptado de Kunii e Levenspiel 1991).	17
Figura 2.3 – Curva de fluidização para ensaio de velocidade de mínima fluidização (adaptado de Kunii e Levenspiel 1991).....	19
Figura 2.4 – Pontos de ignição de carvões minerais (GARCIA, 2013)	30
Figura 3.1 – Microscopia eletrônica de varredura da areia de fundição.....	32
Figura 3.2– Esquemático do combustor de leito fluidizado borbulhante	38
Figura 3.3 – Analisador de gases de combustão portátil Chemist 500.....	39
Figura 4.1 - Experimento de mínima fluidização para areia de filtro e altura de leito 0,228 m	44
Figura 4.2 – Microscopia eletrônica de varredura do carvão CE 4500	47
Figura 4.3 Microscopia eletrônica de varredura da biomassa	49
Figura 4.4 – Perda de massa dos combustíveis submetidos a análise termogravimétrica.....	51
Figura 4.5 – Análise DTG das curvas termogravimétricas dos combustíveis.....	52
Figura 4.6 – Perfil típico das temperaturas no combustor	53
Figura 4.7 – Influência da biomassa nas emissões de CO ₂ corrigido para 7% de O ₂ : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf	56
Figura 4.8 – Influência da biomassa nas emissões de CO corrigido para 7% de O ₂ : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf	57
Figura 4.9 – Influência da biomassa nas emissões de NO _x corrigido para 7% de O ₂ : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf	59
Figura 4.10 – Influência da biomassa nas emissões de C _x H _y corrigido para 7% de O ₂ : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf	60
Figura 4.11 - Influência da biomassa nas emissões de SO ₂ corrigido para 7% de O ₂ : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf	61
Figura 4.12 – Temperatura do leito função do combustível: a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf.	63
Figura 4.13 – Análise da flutuação de temperatura do termopar F1 a partir do desvio padrão	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites de emissão para poluentes provenientes de processos de geração de calor a partir de derivados de madeira (Resolução 436/2011 – CONAMA)	26
Tabela 2.2 – Limites de emissão provenientes da geração de calor a partir de carvão mineral, xisto sólido, coque e outros combustíveis assemelhados (Resolução 016/2014 – SEMA).....	26
Tabela 3.1 – Características do carvão energético Copelmi CE 4500 recebido.....	34
Tabela 3.2 – Coeficientes de conversão das unidades dos gases (adaptado de Clarke, 1998) .	40
Tabela 3.3 – Matriz de testes	40
Tabela 4.1 – Propriedades das partículas do leito	43
Tabela 4.2 – Velocidade de mínima fluidização experimental das partículas do leito	44
Tabela 4.3 – Características do carvão CE 4500	46
Tabela 4.4 – Granulometria do carvão mineral	47
Tabela 4.5 – Características da biomassa de pinus.....	48
Tabela 4.6 – Granulometria da serragem de pinus	49
Tabela 4.7 – Termogravimetria dos combustíveis.....	50
Tabela 4.8 – Análise de perda ao fogo das cinzas	55

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
LABSATC	Laboratório SATC
NBR	Norma Brasileira
RNC	Rede Nacional de Combustão
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SEMA	Secretaria do meio Ambiente e Recursos Hídricos (Paraná)
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

\overline{AF}	Relação ar-combustível na mistura [-]
\overline{AF}_{esteq}	Relação ar-combustível estequiométrica na mistura [-]
C_m	Fração mássica de carbono no combustível [-]
d	Diâmetro médio das partículas [m]
H_m	Fração mássica de hidrogênio no combustível [-]
L	Altura do leito [m]
m_a	Massa de ar [kg]
m_f	Massa de combustível [kg]
m_{O_2}	Massa de oxigênio, kg O ₂ /kg de combustível [-]
N_m	Fração mássica de nitrogênio no combustível [-]
O_m	Fração mássica de oxigênio no combustível [-]
S_m	Fração mássica de enxofre no combustível [-]
U_s	Velocidade superficial do fluido [m/s]:
ΔP	Perda de carga [Pa]
ε	Fração de vazios do leito [-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [Pa s]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]
Φ	Razão de equivalência [-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 ORDENAÇÃO DA PESQUISA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SÓLIDOS PARTICULADOS.....	14
2.1.1 Classificação de Geldart	14
2.1.2 Regimes de Fluidização.....	16
2.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização.....	18
2.2 COMBUSTORES DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE.....	19
2.2.1 Principais Características	20
2.3 COMBUSTÃO	21
2.3.1 Estequiometria de Combustão	22
2.3.1.1 Excesso de Ar	23
2.3.2 Gases de Combustão.....	23
2.3.2.1 Legislação Ambiental	25
2.3.3 Cinética de Combustão	27
2.3.3.1 Aquecimento e secagem	28
2.3.3.2 Pirólise ou devolatilização.....	28
2.3.3.3 Oxidação dos voláteis.....	28
2.3.3.4 Oxidação do <i>char</i>	29
2.3.3.5 Formação das emissões gasosas	29
2.3.4 Ponto de ignição.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 PARTÍCULAS DO LEITO	31
3.1.1 Areia de Fundição.....	31
3.1.2 Areia de Filtro.....	32
3.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização das Partículas do Leito.....	32
3.2 COMBUSTÍVEIS.....	33
3.2.1 Carvão Mineral.....	33

3.2.2 Biomassa	35
3.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	35
3.4 COMBUSTOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE	36
3.5 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS TESTES	40
3.6 COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 ANÁLISE E DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO LEITO	43
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS	45
4.2.1 Caracterização do Carvão Mineral	45
4.2.2 Caracterização da Biomassa	48
4.3 TERMOGRAVIMETRIA DOS COMBUSTÍVEIS	50
4.4 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO COMBUSTOR	52
4.4.1 Análise das Cinzas por Perda ao Fogo	54
4.5 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL NAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	55
4.5.1 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de CO₂	55
4.5.2 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de CO	57
4.5.3 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de NO_x	58
4.5.4 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de C_xH_y	60
4.5.5 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de SO₂	61
4.6 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL NAS TEMPERATURAS OBSERVADAS NO LEITO	62
4.7 FLUTUAÇÃO DE TEMPERATURA DO <i>FREEBOARD</i> EM FUNÇÃO DA INTERMITÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO	64
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a combustão é uma alternativa barata e de fácil acesso para a geração de energia. Segundo a Rede Nacional de Combustão (RNC), aproximadamente 80% da energia (térmica) utilizada no Brasil é proveniente da queima de derivados de petróleo, gás natural, carvão mineral, lenha, carvão vegetal e resíduos agroindustriais (RNC, 2017). Deste modo, uma contínua evolução das tecnologias de combustão se faz necessária para o melhor aproveitamento dos combustíveis e da melhor forma de mitigar os impactos ambientais tornando os processos mais sustentáveis e ambientalmente harmoniosos.

Dentre as principais tecnologias de combustão aplicadas a combustíveis sólidos, podemos evidenciar as tecnologias de conversão energética utilizando leito fluidizado como mais modernas e ambientalmente mais amigáveis quando comparadas com os processos de conversão mais tradicionais, como combustores de leito fixo e pulverizado.

Uma grande vantagem pertinente à tecnologia de leito fluidizado é a possibilidade de gaseificação e combustão de combustíveis sólidos de baixa qualidade, como carvões com alto teor de cinza (disponíveis no sul do Brasil) e biomassas com altos teores de umidade, a partir da boa uniformidade da temperatura de operação do leito. Dentre as características dos leitos fluidizados que proporcionam esta vantagem, é possível apontar as altas taxas de transferência de calor e de massa como uma das mais importantes (COLLOT, 2006).

Das aplicações das tecnologias de leito fluidizado na indústria destacam-se a conversão energética (geração de vapor, gaseificação e incineração), o processamento petroquímico (craqueamento catalítico e síntese por Fisher-Tropsch) e mineral (calcinação de alumina, torrefação de minérios, pré-redução de minério de ferro, pré-calcinação para manufatura de cimento), química e farmacêutica (anidrido ftálico a partir do naftaleno, conversão de metanol para olefinas etc.), processamento físico (secagem, recobrimento de partículas, tratamento de calor) entre outros (BASU, 2006).

Este estudo propõe-se a testar experimentalmente a utilização de carvão mineral brasileiro em queima combinada com biomassa utilizando um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada e, a partir de dados experimentais, determinar as diferenças em relação à queima simples de carvão mineral. Assim, com base nos resultados, se poderá determinar as possíveis vantagens da utilização da queima combinada, especialmente em relação às emissões atmosféricas geradas durante o processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo determinar os efeitos, nos gases de combustão, da utilização da biomassa em queima combinada com carvão mineral brasileiro de alta cinza em um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Testar variações da razão de carvão mineral/biomassa na alimentação do combustor visando avaliação operacional;
- Verificar a influência, nas emissões, da inclusão da biomassa em queima combinada com carvão quando comparada com queima singular de carvão mineral;
- Determinar dentre as condições testadas, aquelas que apresentam os melhores desempenhos em termos de operacionalidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente a queima combinada com combustíveis renováveis vem sendo uma alternativa mais sustentável à utilização dos combustíveis fósseis amplamente utilizados na indústria. Aliado a isso, a combustão em leito fluidizado borbulhante se apresenta como uma tecnologia capaz de operar de maneira satisfatória mesmo com a mudança de comportamento que os combustíveis apresentam quando misturados em proporções e características distintas. No entanto, existe a necessidade de maior entendimento da tecnologia quando da utilização de carvão mineral brasileiro em queima combinada com combustíveis renováveis, tema que até o momento foi pouco explorado e dispõe de diminuta bibliografia disponível.

Para evitar gastos demasiadamente grandes, combustores de pequeno porte, em escala de laboratório, bancada e até mesmo piloto são de grande utilidade na avaliação deste tipo de processo.

1.3 ORDENAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em capítulos com objetivo de desmembrar a pesquisa em assuntos específicos facilitando o entendimento do leitor.

O próximo capítulo trata da revisão bibliográfica que norteia o estudo, dando ênfase aos materiais sólidos particulados, suas características e comportamentos em operações de fluidização. Também trata de combustores de leito fluidizado borbulhante e termina com as características típicas das reações de combustão.

No capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos utilizados neste trabalho, incluindo as areias candidatas para uso no leito do equipamento, principais características dos combustíveis e a descrição da análise termogravimétrica utilizada neste trabalho. No mesmo capítulo são ainda descritas as características do aparato experimental.

No capítulo posterior são descritas as metodologias empregadas na execução dos testes e o processamento dos dados coletados.

O capítulo 5 trata dos resultados encontrados durante os ensaios realizados para definição dos materiais envolvidos bem como a análise dos dados coletados na execução dos testes de combustão.

Por fim o capítulo 6 sumariza as principais conclusões do presente trabalho e é seguido pela lista de referências utilizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados os temas relacionados aos sólidos particulados utilizados neste trabalho bem como às características dos equipamentos, comportamento das suas operações e aspectos da combustão.

2.1 SÓLIDOS PARTICULADOS

Conforme descrito por Kunii e Levenspiel (1991), a fluidização é uma operação pela qual partículas sólidas são levadas a um estado de fluidez através da suspensão em um gás ou líquido. A partir deste conceito é possível admitir que os sólidos particulados são parte essencial no estudo de fluidização em geral, sendo responsáveis por grande influência do comportamento do fenômeno a partir de suas características.

Em processos de combustão utilizando leito fluidizado, os sólidos particulados são encontrados concentradamente formando o leito, nos combustíveis e em alguns casos na utilização de aditivos, como o calcário para o controle da emissão de compostos de enxofre na combustão de carvão mineral.

As características físicas e morfológicas das partículas afetam desde fenômenos moleculares (tais como difusão mássica) que ocorrem no interior das partículas e/ou entre partículas, até o dimensionamento de uma coluna ou reator utilizado por exemplo para combustão em leito fluidizado (seja no aspecto construtivo, como diâmetro e altura útil, seja no aspecto operacional, como na definição de vazão e perda de carga) (CREMASCO, 2012).

Deste modo podemos afirmar que uma das características fundamentais associadas as partículas utilizadas no processo de fluidização é a massa específica. Define-se a massa específica de carga (em repouso), como a massa medida de uma amostra de particulados dividida pelo volume ocupado pela amostra, sendo assim considerados os espaços existente entre as partículas, também chamado de porosidade do leito estático.

2.1.1 Classificação de Geldart

Baseado no comportamento das partículas em estados de fluidização, Derek Geldart dividiu os sólidos particulados em quatro grupos distintos a partir da diferença de massa específica dos sólidos e do gás de fluidização além do tamanho médio das partículas (GELDART, 1973). Os grupos (A, B, C e D) distinguem-se principalmente pela formação das

bolhas e comportamento hidrodinâmico do conjunto de partículas quando submetido à fluidização.

Grupo A: Têm características de fluidização com aeração. Quando fluidizados, inicialmente originam uma região de fluidização não borbulhante a partir da velocidade de mínima fluidização, com expansão gradativa do leito, seguida por uma fluidização borbulhante bem uniforme, a partir do aumento da velocidade superficial do gás. Segundo Basu (2006), em leitos fluidizados com partículas do grupo A, o aparecimento de bolhas se inicia a partir de um outro valor de velocidade característica, chamada velocidade de mínimo borbulhamento.

Grupo B: Este grupo tem partículas conhecidas por suas características de areias. Fluidizam bem com velocidades acima da de mínima fluidização e têm formação de um vigoroso borbulhamento. As bolhas coalescem muito durante a subida da base até o topo do leito.

Grupo C: Caracteriza-se por partículas muito finas e coesivas. As forças inerentes as partículas são muitas vezes maiores que as forças exercidas pelo gás, tornando a fluidização difícil. Podem ocorrer canais preferenciais no leito.

Grupo D: Este grupo de partículas tem diâmetros relativamente grandes e fluidização muito particular. As bolhas formadas durante a fluidização podem atingir toda a área da seção do reator formando jorros e empistonados.

A massa específica utilizada por Geldart para a caracterização das partículas é definida por Cremasco (2012) de maneira geral, como a massa de um material dividida pelo volume ocupado por ele. A massa específica pode ser classificada ainda como massa específica real (que considera o volume ocupado apenas pelo sólido, desconsiderando o volume ocupado pela porosidade das partículas), massa específica aparente (que considera o volume ocupado como o volume total de uma partícula, incluindo a porosidade desta partícula) e a massa específica de carga que considera o seu volume como a massa de sólidos e a fração de vazios ocupada por um leito de partículas.

A Figura 2.1 apresenta o diagrama proposto por Geldart da classificação das partículas quando submetidas à fluidização gás-sólidos.

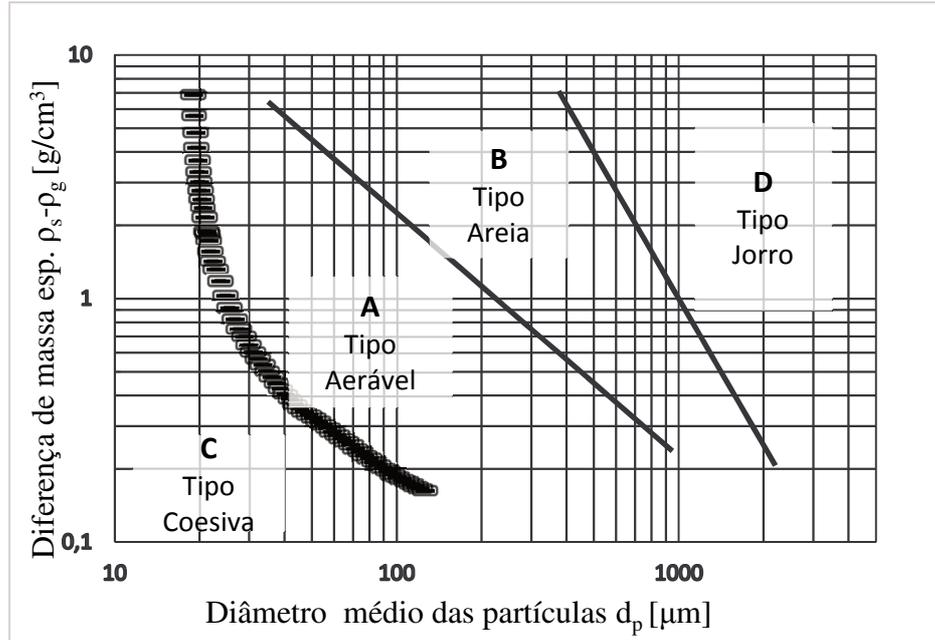


Figura 2.1 – Diagrama da classificação de Geldart (adaptado de Oka, 2004)

2.1.2 Regimes de Fluidização

A fluidização é a operação pela qual partículas sólidas são transmutadas a um estado de fluidez através da interação provocada pelo escoamento com um gás ou líquido. Conforme descrito por Basu (2006), em 1921 o alemão Fritz Winkler introduziu produtos gasosos de combustão, em alta temperatura, no fundo de um cadinho contendo partículas de coque, criando a primeira demonstração de gaseificação de carvão em leito fluidizado. Winkler observou que as partículas eram movimentadas pelo arrasto exercido pelo escoamento do gás e a mistura tinha aspecto de um líquido fervente.

A partir disso, os reatores de leito fluidizado tiveram seu desenvolvimento motivado nas necessidades da indústria sendo as principais aplicações desta tecnologia voltadas para a conversão energética, geração de calor, processamentos petroquímicos, minerais e físicos além da indústria química e farmacêutica.

Os regimes de fluidização variam de acordo com os tipos e características dos sólidos e fluidos, bem como pela velocidade com que o fluido passa através do leito. A Figura 2.2 apresenta os principais regimes de fluidização a partir da variação da velocidade do fluido atuando em um leito de partículas.

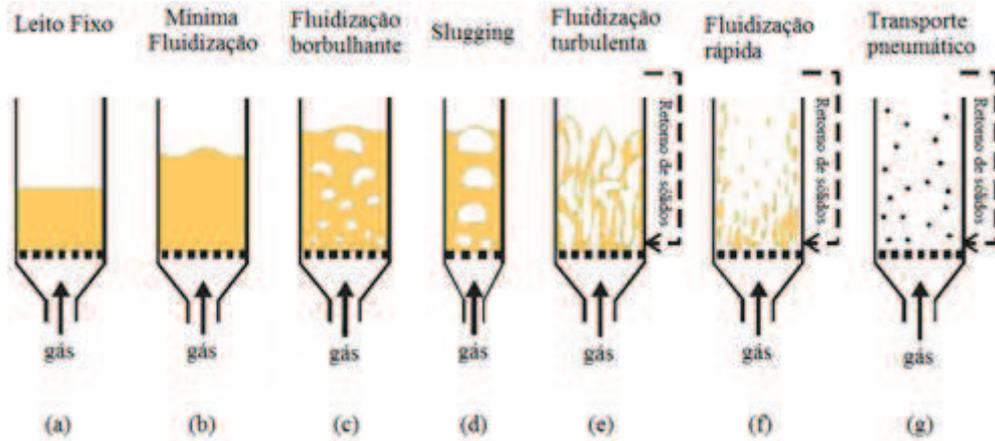


Figura 2.2 - Regimes de fluidização: a – leito fixo, b – mínima fluidização, c – fluidização borbulhante, d – *slugging*, e – fluidização turbulenta, f – fluidização rápida, g - transporte pneumático (adaptado de Kunii e Levenspiel 1991).

Um leito fixo refere-se a um leito de partículas estacionárias dispostas sobre uma placa perfurada por onde o fluido esco. Neste leito o fluido esco através dos espaços entre as partículas sem interferir na disposição do leito. A força de arrasto exercida pelo fluido escoando através do leito é menor que a força peso das partículas, impedindo que ocorra movimentação.

Para realizar a previsão matemática da perda de carga através de um leito fixo sólido-gás, Zhang (2005), apresenta a equação de Ergun e considera a perda total de energia em um leito fixo como a soma das perdas cinética e viscosa. Admitindo que o número de Reynolds em leitos fixos é relativamente baixo, é razoável admitir que a perda de energia viscosa constitui a maior resistência. A perda de carga pode ser calculada conforme equação 2.1 por Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu U_s (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho U_s^2 (1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

onde ΔP é a perda de carga relativa ao leito, L é a altura do leito, μ é a viscosidade dinâmica do leito, ρ é a massa específica do fluido, U_s é a velocidade superficial do fluido, ε é a fração de vazios do leito e d é o diâmetro médio das partículas do leito. A velocidade superficial de uma fase fluida é definida como a vazão do fluido dividida pela área transversal do tubo.

Conforme Basu (2006), se a taxa de escoamento de fluido através do leito fixo for aumentada, a perda de carga aumenta continuamente conforme a equação 2.1 até que a velocidade superficial do gás alcance um valor crítico conhecido como velocidade de mínima fluidização. Nesta velocidade, a força de arrasto é igual à força peso da partícula e o leito fixo

passa a um estado de fluidização incipiente. Neste estado, a mistura de gás e sólidos atingem o estado ou regime de fluidização.

Nos sistemas gás sólido, quando o escoamento do fluido é aumentado a partir da mínima fluidização, apresentam-se grandes instabilidades, ocasionando a formação de bolhas e canais preferenciais. Com altas taxas de escoamento, a agitação é maior e o movimento dos sólidos se torna mais vigoroso. Adicionalmente, o leito não continua se expandindo consideravelmente em relação à expansão ocorrida até a velocidade de mínima fluidização. Neste caso, é possível comparar o sistema com o movimento de líquidos ferventes onde bolhas se formam na base, coalescem durante a subida e eclodem na superfície do leito. As bolhas aumentam de tamanho a partir do aumento da velocidade superficial do fluido (GRACE et al., 1997). Esse tipo de leito é chamado de leito fluidizado borbulhante.

A formação do fenômeno de *slugging* durante a fluidização de particulados ocorre basicamente em função da geometria do reator e é mais presente em partículas do grupo D da classificação de Geldart. Se o leito é estreito e profundo, as bolhas podem crescer até um tamanho comparável ao diâmetro do reator e neste caso as bolhas atravessam o leito gerando pistonamentos (BASU, 2006).

Acima do limite de velocidade conhecido como velocidade terminal das partículas, a superfície do leito não apresenta um limite claro e as partículas se movimentam de forma turbulenta, onde aglomerados de sólidos e zonas de gás de tamanhos e formas diversos são vistos. Este regime é chamado de fluidização turbulenta (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Por fim o regime de transporte pneumático não apresenta zonas definidas de leito sendo as partículas sólidas homogeneamente distribuídas em todo o reator. Conforme Kunii e Levenspiel (1991), a taxa de massa de gás é grande o suficiente para carregar os sólidos para fora do leito com o gás.

2.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização

Segundo Grace et al. (1997), a menor velocidade de um gás capaz de fazer com que todas as partículas de um leito fiquem suspensas é chamada de velocidade de mínima fluidização. Neste regime, o leito de sólidos tem características de fluido. De acordo com Kunii e Levenspiel (1991), neste caso a força de arrasto provocada pelo gás nas partículas se equivale à força peso, promovendo a suspensão dos sólidos.

Para determinação experimental da velocidade de mínima fluidização, o leito de partículas é submetido a um aumento gradual da velocidade superficial do gás onde o

comportamento da perda de carga inicialmente se aproxima do descrito pela equação de Ergun (2.1) para leitos fixos. A partir da mínima fluidização o leito se expande consideravelmente e a perda de carga não tem mais crescimento conforme previsto pela equação de Ergun (equação 2.1). Partindo deste princípio, Kunii e Levenspiel (1991) propuseram que a velocidade de mínima fluidização poderia ser encontrada através da análise do gráfico de perda de carga no leito em função da velocidade superficial do fluido conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

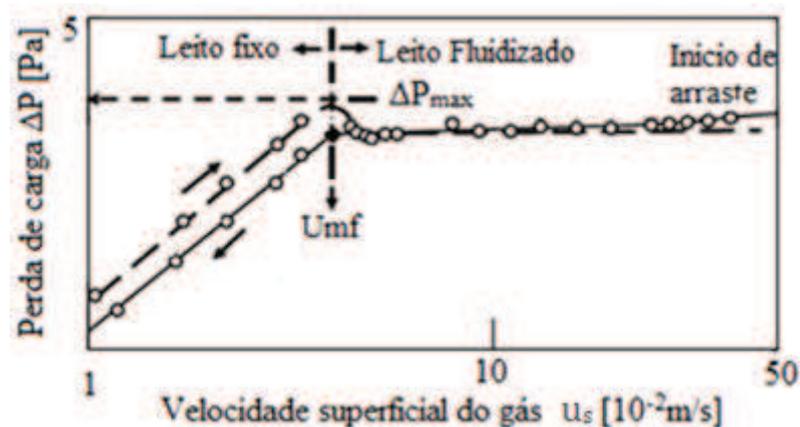


Figura 2.3 – Curva de fluidização para ensaio de velocidade de mínima fluidização (adaptado de Kunii e Levenspiel 1991)

Pelo método proposto a velocidade de mínima fluidização é determinada pela interseção de duas curvas de ajuste dos dados experimentais que representam, respectivamente, o regime de leito já fluidizado e o regime de regressão desde o leito fluidizado até a velocidade nula. Esta representação gráfica é típica de partículas com boa homogeneidade na sua granulometria, sendo que para partículas com grandes dispersões granulométricas, existe uma tendência das curvas de fluidização e defluidização se sobreporem.

2.2 COMBUSTORES DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Dentre os equipamentos que operam com a tecnologia de fluidização, o leito fluidizado borbulhante é o que tem maior aplicação. As caldeiras de leito fluidizado têm substituído gradativamente as tradicionais caldeiras de leito fixo nas utilizações industriais.

A fornalha de leito fluidizado tradicionalmente compreende uma zona de leito de partículas denso e uma zona pobre em sólidos chamada *freeboard* localizado acima do leito. A

energia da queima de combustíveis é liberada nas duas zonas em uma porcentagem aproximada de 88% no leito e 12% no *freeboard* (BASU, 2006).

2.2.1 Principais Características

A temperatura no leito denso, em aplicações industriais, tem seus valores mantidos normalmente entre 800 e 900 °C, para garantir adequada troca térmica no caso de caldeiras, porém esta temperatura deve ser controlada em função de parâmetros relativos ao processo e aos combustíveis utilizados evitando amolecimento de cinzas e aparecimento de escórias. Um bom dimensionamento do distribuidor do ar primário garante melhor uniformidade da entrada de ar e conseqüentemente combustão mais homogênea na zona do leito, fato que contribui para prevenção de zonas de superaquecimento que não são desejadas.

Em termos de fluidização, o ar primário (injetado na base da câmara de combustão) deve ser adequado para fluidizar todo o material presente no leito, porém esta velocidade não deve superar a velocidade terminal dos sólidos mais finos do leito evitando o arraste das partículas menores para fora do leito. Alguns fabricantes estimam esta velocidade como de 3 a 4 vezes a velocidade de mínima fluidização para um tamanho de partículas médio do leito (BASU, 2006).

Como vantagens da utilização de combustores de leito fluidizado destacam-se a flexibilidade na utilização de combustíveis, incluindo carvões de alta cinza (60-70%) e baixo material volátil (menor que 1%) e a pouca utilização de partes móveis no sistema, gerando grande robustez. Outras vantagens são a boa flexibilidade na granulometria do combustível, o que confere menor despesa na sua preparação, a admissibilidade de altos teores de umidade no combustível, além de permitir a remoção de compostos de enxofre através da aplicação direta de dolomita no leito, a alta eficiência de combustão (90-98%), as baixas emissões de NO_x devido às baixas temperaturas de operação.

Entretanto, como principais desvantagens na utilização de leito fluidizado borbulhante, apresentam-se a erosão que ocorre principalmente na zona de alta densidade de partículas, a necessidade de áreas relativamente grandes quando comparadas com sistemas a combustível pulverizado e leito fluidizado circulante, a necessidade de boa uniformidade na dispersão do combustível no leito, o que exige múltiplos alimentadores para unidades maiores, além de apresentar limitações para operar com carga parcial.

2.3 COMBUSTÃO

Conforme descrito por Carvalho e McQuay (2007), o processo de combustão caracteriza-se por uma série de reações muito rápidas entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor. Em geral, os elementos químicos responsáveis pela liberação de calor, quando oxidados, são carbono, hidrogênio e enxofre. Já Mahallawy e Habik (2002), definem a combustão como uma reação exotérmica rápida que libera substancial quantidade de energia como calor e chamas a partir das reações de combustão, e que tem habilidade de se propagar através de um meio adequado. Esta propagação é resultado de um forte acoplamento das reações com o processo de transporte molecular. De maneira mais completa a combustão é descrita por Annamalai e Puri (2007), para sistemas de combustão, como muito complexos podendo envolver escoamento bifásico (líquido e ar em uma turbina a gás, sólido e ar em uma caldeira de carvão, etc.), turbulência e variação de massas específicas entre as fases, troca de calor por condução, convecção e radiação, altas pressões, a termoquímica dos combustíveis e reagentes podem envolver-se em problemas multicomponentes, mecanismos complexos de cinética química, mudanças das propriedades em múltiplos componentes a partir da mudança de temperatura.

Os três maiores requisitos para uma boa combustão são tempo, temperatura adequada e turbulência. Estes três requisitos são alcançados com a utilização de leitos fluidizados.

Combustíveis sólidos injetados para a queima em um leito fluidizado seguem a seguinte sequência de eventos: Aquecimento e secagem, devolatilização e queima dos voláteis, inchamento e fragmentação primária (para alguns tipos de carvão) e combustão do material carbonoso com fragmentação secundária e atrito (BASU, 2006).

A massa de combustível presente em um combustor de leito fluidizado constitui cerca de 0,5 a 5 % em massa do total de sólidos do leito, sendo o restante constituído de partículas do leito, cinza proveniente do combustível, adsorventes e outros materiais não combustíveis. Por esta diferença o combustível que é inserido no equipamento é rapidamente envolvido pelo material quente do leito elevando a temperatura do combustível. A taxa de aquecimento varia de 100 °C/s até mais de 1000 °C/s, dependendo de muitos fatores, entre estes, a granulometria do combustível (BASU, 2006).

2.3.1 Estequiometria de Combustão

Uma combustão pode ser considerada completa quando um combustível recebe a quantidade de oxigênio suficiente para que todo o carbono, hidrogênio e enxofre sejam oxidados para dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e dióxido de enxofre (SO₂) respectivamente (CARVALHO e MCQUAY, 2007). A esta quantidade de oxigênio chamamos de estequiométrica.

A razão estequiométrica ar-combustível (ou oxidante-combustível) é determinada por um simples balanço estequiométrico da reação química de combustão, considerando que o combustível reage para formar um conjunto ideal de produtos.

Se uma quantidade de oxidante maior do que a estequiométrica é fornecida, diz-se que a mistura é pobre. Fornecer uma quantidade de oxidante menor que a estequiométrica resulta em uma mistura rica. A razão ar-combustível estequiométrica pode ser encontrada conforme a equação 2.2:

$$\overline{AF}_{esteq} = \left(\frac{m_a}{m_f} \right)_{esteq} \quad (2.2)$$

onde \overline{AF}_{esteq} é a relação ar-combustível estequiométrica na mistura, m_a é a massa de ar envolvida na reação de combustão e m_f é a massa de combustível envolvida na reação de combustão.

A partir da razão ar-combustível podemos definir a razão de equivalência, Φ , que é comumente usada para indicar quantitativamente quando uma mistura de oxidante e combustível é rica, pobre ou estequiométrica e pode ser calculada através da equação 2.3 (TURNS, 2013):

$$\Phi = \frac{\overline{AF}_{esteq}}{AF} \quad (2.3)$$

A massa de oxigênio necessário para a queima completa estequiométrica pode ser calculada pela equação 2.4 a partir de um balanço de massa e considerando a conversão de 50% do nitrogênio orgânico para NO pelo processo de formação de NO_x combustível (GARCIA, 2013).

$$mO_2 = 2,667C_m + 8\left(H_m - \frac{O_m}{8}\right) + S_m + \frac{1,14}{2}N_m \quad (2.4)$$

onde mO_2 é a massa de oxigênio por quilograma de combustível, C_m é a massa de carbono no combustível, H_m é a massa de hidrogênio no combustível, O_m é a massa de oxigênio no combustível, S_m é a massa de enxofre no combustível e N_m é a massa de nitrogênio no combustível.

2.3.1.1 Excesso de Ar

Nas aplicações industriais o excesso de ar é definido como um percentual acima da quantidade estequiométrica de ar e é quase sempre necessário para completar as reações do processo de combustão (CARVALHO e MCQUAY, 2007). Em condições práticas, a mistura de ar e combustível nunca é perfeita. Algumas áreas da câmara de combustão terão oxigênio suficiente para a combustão completa, outras serão deficientes em oxigênio enquanto outras serão muito pobres em oxigênio. Fundamentalmente, todas as partículas de combustível devem ter oxigênio suficiente para completar sua queima, deste modo, oxigênio extra sempre é adicionado em combustores de leito fluidizado em forma de excesso de ar.

Segundo Basu (2006), com o excesso de ar, a eficiência da combustão é aumentada, porém é menos significativa para valores acima de 20%, quando é utilizado carvão mineral como combustível.

Para a determinação do excesso de ar, utiliza-se a equação 2.5:

$$\% \text{ excesso de ar} = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

2.3.2 Gases de Combustão

Originalmente desenvolvidas com características para serem compactas, pré-fabricadas em uma indústria e encaminhadas para o cliente, as caldeiras de leito fluidizado apresentaram não apenas custos potencialmente menores e modo eficiente para queima de combustível, mas geram menores emissões de gases poluentes quando comparadas com caldeiras convencionais (MILLER e TILMAN, 2008).

Segundo Garcia (2013), os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico são os materiais particulados (MP), óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2) além dos óxidos de nitrogênio (NO , N_2O e NO_2). As quantidades destes poluentes dependem naturalmente dos combustíveis usados, das tecnologias empregadas na queima, do estado de conservação do equipamento e também das condições de operação destes.

Material particulado é a denominação genérica que engloba fumaça, fuligem e cinzas. Fuligem são pequenas partículas de carbono e material carbonoso, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas com as cinzas resultantes da combustão completa do restante do combustível. Na prática, a fuligem se caracteriza pelo teor escuro presente nos gases de exaustão. A fumaça propriamente dita é constituída por gotículas de hidrocarbonetos ou outros produtos químicos voláteis não queimados (GARCIA, 2013).

Conforme Miller e Tillman (2008), o enxofre é oxidado durante a combustão resultando na formação de óxidos de enxofre. Nos leitos fluidizados borbulhantes, é comum a utilização de calcário diretamente no leito para a remoção do dióxido de enxofre. A eficiência de retenção pode ser maior que 95% quando utilizadas quantidades significativas de calcário. Os compostos de enxofre (SO_x) são potencialmente agressivos aos metais tipicamente utilizados na construção de equipamentos, uma vez que sua forma aquosa produz ácido sulfúrico, altamente corrosivo aos aços de baixo cromo, além de provocar chuvas ácidas e problemas respiratórios.

O monóxido de carbono é um gás inodoro, formado a partir da combustão incompleta de combustíveis carbonosos. É altamente tóxico, uma vez que reage com a hemoglobina das hemácias do sangue formando carboxiemoglobina, tornando a célula incapaz de capturar o oxigênio e realizar a troca gasosa nos pulmões. A sua concentração depende basicamente da temperatura dos gases e da disponibilidade de oxigênio para sua oxidação. Baixos excessos de ar levam a altos teores de monóxido de carbono (GARCIA, 2013).

O dióxido de carbono é resultado, dentre outros mecanismos, a partir da oxidação do monóxido de carbono na reação de combustão. Apesar de estar presente na natureza e representar um importante componente para a manutenção da vida, atualmente, a partir da utilização indiscriminada de combustíveis fósseis, o dióxido de carbono tem sido tratado como principal mecanismo para o aumento da temperatura global devido à sua característica de provocar o efeito estufa no planeta. A utilização de combustíveis renováveis como a biomassa, leva à neutralidade do ciclo do CO_2 , uma vez que o dióxido de carbono emitido na combustão é reabsorvido no crescimento natural da planta. Deste modo, a queima combinada de biomassa

com um combustível fóssil impacta positivamente na redução global das emissões deste gás, uma vez que a biomassa (CO_2 neutro) substitui parte do combustível fóssil na queima.

Os óxidos de nitrogênio (principalmente NO , NO_2 e N_2O , referidos como NO_x) são formados nos combustores de leito fluidizado principalmente por dois caminhos, a oxidação do nitrogênio presente no combustível (NO_x combustível) e reações entre o oxigênio e o nitrogênio presentes no ar (NO_x térmico). Uma vez que o NO_x térmico é produzido com altas temperaturas (principalmente acima de 1480°C) ele é responsável por representar uma pequena fração do NO_x produzido nas fornalhas, sendo o NO_x combustível o responsável pela maior contribuição (MILLER e TILLMAN, 2008). Vale ressaltar ainda, conforme descrito por Turns (2013), a formação do NO_x imediato a partir do mecanismo de Fenimore e que está intimamente ligado à química da combustão de hidrocarbonetos. A partir deste mecanismo, NO é rapidamente produzido na zona de chama, em chamas laminares pré-misturadas antes da formação do NO_x térmico. Este efeito é muito pouco percebido na combustão em leito fluidizado borbulhante devido à dinâmica da combustão e ao tipo de mistura do combustível e o ar.

O aumento do nitrogênio no combustível gera aumento nas emissões de NO e N_2O combustível. Entretanto, com o aumento da matéria volátil do combustível, o NO aumenta enquanto o N_2O tende a diminuir (MILLER e TILLMAN, 2008). Com o aumento do percentual de biomassa (alto teor de voláteis) na queima combinada com carvão mineral, este efeito deve ser observado.

2.3.2.1 Legislação Ambiental

A resolução 436 de 2001 do CONAMA estabelece os limites máximos de emissão de poluentes para fontes fixas em âmbito nacional, sendo importante documento para controle das emissões derivadas da combustão.

Para combustíveis sólidos, a resolução 436 do CONAMA apresenta limites de emissões de material particulado bem como NO_x e CO em função da potência térmica nominal do equipamento conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Limites de emissão para poluentes provenientes de processos de geração de calor a partir de derivados de madeira (Resolução 436/2011 – CONAMA)

Potência Térmica Nominal [MW]	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾ (como NO ₂)	CO ⁽¹⁾
MW ≤ 0,5	730	NA	7800
0,5 < MW ≤ 2	730	NA	3900
2 < MW ≤ 10	730	NA	3250
10 ≤ MW ≤ 50	520	650	NA
MW > 50	300	650	NA

⁽¹⁾ Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/m³ nas condições normais de temperatura e pressão, em base seca a 8% de oxigênio.

NA – Não aplicável.

A resolução 436 do CONAMA não menciona limites de emissões para processos de geração de calor utilizando carvão mineral ou similares. Entretanto, em âmbito regional, a resolução 016/2014, da SEMA do estado do Paraná, inclui os limites de emissões para carvão mineral e similares, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Limites de emissão provenientes da geração de calor a partir de carvão mineral, xisto sólido, coque e outros combustíveis assemelhados (Resolução 016/2014 – SEMA)

Potência Térmica Nominal [MW]	MP ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾	CO ⁽¹⁾	SO _x ⁽¹⁾
MW ≤ 10	NA	NA	500	NA
10 < MW ≤ 50	250	500	500	3000
50 < MW ≤ 100	200	500	500	1300
MW > 100	60	400	250	1300

⁽¹⁾ Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/m³ nas condições normais de temperatura e pressão, em base seca a 7% de oxigênio.

NA – Não aplicável.

Em relação às emissões atmosféricas, autores como Jones et al. (2017), observaram que a queima combinada de carvão betuminoso e madeira resultou na redução das emissões de material particulado e NO_x quando utilizado um combustor de leito fixo. Jurado et al. (2017), verificaram a atenuação das concentrações de SO₂ e crescimento nas concentrações de HCl a partir do aumento da proporção de biomassa (resíduos de cereal) sobre o carvão sul-americano El Cerrejon, utilizando uma unidade piloto de queima pulverizada em condições de queima com ar e oxi-combustão. Também em condições de oxi-combustão, Rianza et al. (2013), constataram a diminuição das emissões de NO quando misturas de biomassa (resíduos de azeitona) foram queimadas junto com carvões (semi-antracito espanhol e betuminoso de alto volátil africano) em combustor de fluxo arrastado em escala laboratorial.

Utilizando um reator de leito fluidizado em escala de bancada, Aho et al. (2011) testaram combustíveis chineses, dentre eles dois carvões, duas palhas e uma serragem e observaram a formação de cloretos alcalinos (altamente corrosivos) na queima simples das palhas. O estudo verificou que a queima combinada com carvões chineses diminuiu a formação de cloretos alcalinos a partir da sulfatação dos mesmos quando utilizado carvão com alto teor de alumínio e silício.

A partir de simulação em um forno de queda livre utilizando queima combinada de carvão de baixo *rank* e cacho de palmeira, Darmawan et al. (2017) observou melhores resultados em termos de temperatura e composição de gás para misturas entre 10 e 25 % de biomassa misturado ao carvão.

Desta forma, o emprego da queima de carvão aliado a biomassas exerce influência positiva no cumprimento das legislações ambientais para alguns dos gases apresentados, independente da tecnologia empregada na combustão.

2.3.3 Cinética de Combustão

Conforme Mahallawy e Habik (2002) a cinética das reações envolve o quão rápido uma reação elementar acontece. Na cinética química se define a taxa de reação como a massa de produtos são produzidos ou reagentes são consumidos por unidade de tempo e são influenciados por fatores como a temperatura e o tempo.

O processo de combustão envolve etapas múltiplas que muitas vezes são melhores observadas em termos de uma única partícula de combustível. Ele é complexo e inicialmente envolve o aquecimento e secagem da partícula. As partículas secas então pirolisam ou sofrem devolatilização resultando em várias espécies de voláteis e char. Após isso os voláteis são oxidados em uma série de reações de radicais livres. O char também é oxidado em uma série de reações complexas. De maneira adjunta a estas reações verifica-se o comportamento de constituintes inorgânicos e metais traços (Miller e Tillman, 2008).

As reações básicas da combustão são apresentadas por Garcia (2013):





2.3.3.1 Aquecimento e secagem

Quando a partícula de combustível entra no combustor ela é submetida ao aquecimento até a temperatura do equipamento. A partícula úmida evolui para uma partícula aquecida e seca pronta para mais reações. Pelo fato das partículas de combustíveis sólidos serem porosas, como no caso dos carvões de baixo *rank* e biomassas, contém umidade na sua estrutura de poros e o processo de secagem pode promover a explosão de uma partícula singular em múltiplas partículas de combustível a partir da expansão rápida do vapor. Deste modo o processo de secagem e aquecimento tem sua temperatura mantida até que a umidade seja segregada.

2.3.3.2 Pirólise ou devolatilização

Como parte da combustão propriamente dita do combustível sólido, a devolatilização é o primeiro processo químico a ocorrer. A devolatilização decorre a partir da pirólise, ou o aquecimento de um combustível na ausência de oxigênio suficiente para causar a oxidação de todo o carbono, hidrogênio e enxofre presentes na matriz combustível. A pirólise sendo uma série de reações endotérmicas, tipicamente envolve dois mecanismos. No primeiro estágio do mecanismo as pontes dos grupos aromáticos são quebradas resultando na formação de *char* e alcatrões. No segundo estágio os átomos são retirados dos grupamentos aromáticos formando matéria volátil não condensável.

2.3.3.3 Oxidação dos voláteis

A oxidação dos voláteis envolve uma série de reações de radicais livres incluindo a inicialização, a propagação, a explosão e a terminação. A iniciação ocorre com as espécies voláteis e fragmentos liberados pela matriz sólida do combustível. De particular importância temos a concentração de radicais hidroxila. Este radical está entre as espécies mais reativas no processo de combustão, promovendo tanto a cadeia de inicialização quanto a cadeia de

propagação. A oxidação dos voláteis ocorre de maneira extremamente rápida (Miller e Tillman, 2008).

2.3.3.4 Oxidação do *char*

A oxidação do *char* é um processo altamente complexo. Mecanicamente, o *char* começa a ser oxidado quando a liberação de voláteis está praticamente finalizada e o oxigênio do ambiente de combustão consegue alcançar a superfície da partícula de *char*. A oxidação do *char* é extensivamente controlada por difusão. A taxa de oxidação do *char* é geralmente governada pela pressão parcial do oxigênio na fornalha como um todo além da superfície e temperatura da partícula. Segundo Miller e Tillman (2008), em temperaturas acima de 900 °C a taxa do consumo de oxigênio na oxidação do *char* é totalmente governada pela difusão do oxigênio na superfície da partícula.

Essencialmente, a oxidação do *char* ocorre por caminhos que produzem combustíveis gasosos que são oxidados completamente. As reações dominantes são aquelas onde o oxigênio penetra a superfície da partícula produzindo e liberando monóxido de carbono para subsequente oxidação. As reações de gaseificação, embora presentes, contribuem muito menos no consumo do *char*.

2.3.3.5 Formação das emissões gasosas

Como resultado da combustão observam-se as emissões gasosas. Das reações de oxidação dos voláteis as mais significantes são aquelas que promovem ou inibem a formação de poluentes como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x).

A maior parte da formação do monóxido de carbono ocorre na ausência de oxigênio suficiente para a combustão completa do combustível. Parte das reações de oxidação do monóxido de carbono não ocorrem em função de serem freadas a partir da insuficiente temperatura para sustentar estas reações.

O dióxido de enxofre é diretamente formado a partir dos produtos da combustão quando praticamente todo o enxofre é oxidado. Algum dióxido de enxofre pode ser oxidado a trióxido de enxofre (SO₃). A formação de SO₃ pode ser verificada na coloração azulada dos gases de exaustão.

Os óxidos de nitrogênio representam a classe de componentes incluindo NO, NO₂, N₂O e outros componentes. Destes, o NO é o produto dominante da combustão. Todavia ele pode oxidar a NO₂ no ambiente. A formação de NO_x pode ocorrer pela oxidação do nitrogênio do combustível ou pelo nitrogênio proveniente do ar.

2.3.4 Ponto de ignição

O ponto de ignição é a condição de pressão e temperatura na qual um combustível é capaz de entrar em combustão mesmo sem a presença de uma chama ou centelha. Os pontos de ignição de carvões minerais podem ser definidos a partir da Figura 2.4 em função de seus teores de matéria volátil (GARCIA,2013).

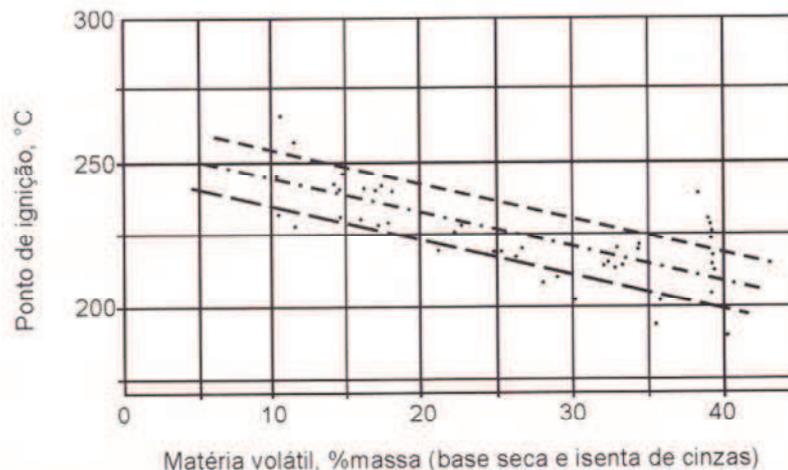


Figura 2.4 – Pontos de ignição de carvões minerais (GARCIA, 2013)

A partir da figura é possível observar que as faixas típicas de ignição para carvão mineral com percentuais de matéria volátil entre 5 e 40% se encontram localizadas entre as temperaturas de 200 e 275°C. Deste modo é possível utilizar como ponto de partida, na combustão segura de carvões brasileiros típicos, temperaturas acima de 275°C. De maneira a prevenir problemas na partida de um equipamento é prudente considerar uma maior temperatura de ignição considerando o percentual variável de umidade do combustível.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo atual propõe-se a analisar o comportamento da queima combinada de carvão mineral brasileiro (CE 4500) com biomassa (serragem de pinus) em um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada, com foco no efeito sobre as emissões da variação da razão carvão/biomassa do combustível utilizado.

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados para realização dos testes (partículas do leito, combustíveis e equipamentos).

3.1 PARTÍCULAS DO LEITO

Os combustores de leito fluidizado borbulhante contém uma massa de sólidos granulares que geralmente tem tamanhos variando entre 0,1 mm e 1,0 mm, dependendo do tipo de aplicação. Estes sólidos são chamados de material do leito e, caracteristicamente, são areias, calcário (quando se queimam carvões com alto teor de enxofre) e cinzas provenientes da queima de carvão quando este é utilizado. Os sólidos inertes do leito representam de 97 a 99% de todo o material particulado presente nestes equipamentos (BASU, 2006).

Para os ensaios atuais foram selecionados dois tipos de partículas candidatas para servirem de base para o leito do combustor, uma areia amplamente utilizada na confecção de moldes de fundição e uma areia utilizada em filtros de água de piscina. Para a caracterização das partículas, ensaios foram realizados com intuito de determinar as massas específicas, utilizando as normas NBR 8630 (ABNT, 1984b) e NBR 9745 (ABNT, 1987) para massa específica de carga e massa específica real, respectivamente. A esfericidade das partículas foi estimada a partir de uma correlação indicada por Foust et al. (1982) a partir da medição da porosidade dos leitos fixos.

3.1.1 Areia de Fundição

A areia nominada areia de fundição, utilizada nos testes experimentais, é amplamente utilizada na confecção de moldes de fundição para a área da siderurgia. É um material particulado inerte e foi selecionado devido à boa regularidade granulométrica e a estar colocada no grupo B da classificação de Geldart. A faixa selecionada por peneiramento tem partículas entre 250 μm e 350 μm e teve seu diâmetro médio estimado em 290 μm , a partir da análise de imagem feita através de microscopia eletrônica de varredura, utilizando um microscópio

eletrônico modelo MEV ZEISS EVO MA10 com EDS Bruker QUANTAX, no laboratório SATC (LABSATC), conforme pode ser verificado na Figura 3.1.

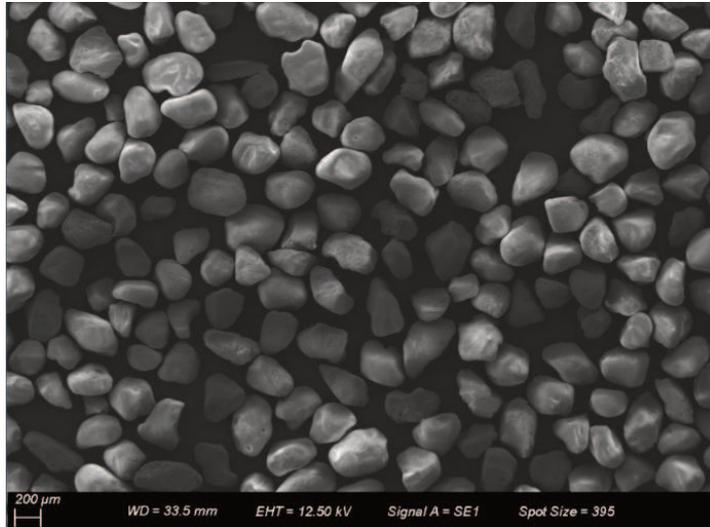


Figura 3.1 – Microscopia eletrônica de varredura da areia de fundição

3.1.2 Areia de Filtro

A areia de filtro foi selecionada por ser um material inerte com granulometria ligeiramente maior que a areia de fundição e estar posicionada no grupo D da classificação de Geldart. Uma vantagem na utilização destas partículas é que o fornecedor normalmente informa a faixa granulométrica para a utilização em filtragem de água (separação de suspensão de sólidos no tratamento de água de piscinas). Além disso, o custo relativamente baixo e a garantia de propriedades constantes também influenciaram na tomada de decisão.

3.1.3 Velocidade de Mínima Fluidização das Partículas do Leito

Baseado na metodologia sugerida por Kunii e Levenspiel (1991), ensaios experimentais foram efetuados de maneira a estabelecer as velocidades de mínima fluidização das partículas do leito pré-selecionadas. Os ensaios para aquisição das velocidades de mínima fluidização utilizadas no presente trabalho foram realizados em uma bancada de leito fluidizado não reativo, em temperatura ambiente e com possibilidade de visualização do fenômeno, uma vez que o equipamento foi montado com partes em acrílico. Os detalhes construtivos do equipamento são descritos por Bianchi et al. (2013).

Após inserido material do leito com uma altura conhecida dentro da câmara de combustão ou *riser*, o agente fluidizante (neste caso o ar) foi insuflado com ajuda de um compressor radial marca Artek, modelo ACRRB 7,5 tendo seu controle de velocidade manejado por um inversor de frequência marca WEG, modelo CFW08. Partindo de insuflamento inicial com velocidade de escoamento zero, o compressor foi acelerado de forma gradual de maneira a aumentar a velocidade do escoamento do agente de fluidização (velocidade superficial) de maneira linear e lenta até que o leito de partículas apresentasse o fenômeno de fluidização já desenvolvido. Com ajuda do monitoramento da perda de carga através do leito e respeitando a metodologia proposta por Kunni e Levenspiel (1991), foi possível definir o momento da fluidização desenvolvida (com a perda de carga deixando de aumentar com o aumento da velocidade do escoamento do agente fluidizante). A partir disso a desaceleração da velocidade do escoamento do agente fluidizante foi realizada também de maneira gradual até o completo desligamento do compressor radial. A taxa de aquisição de dados de perda de carga no leito para este teste foi de 10 Hz. Com os dados coletados, foi possível separar a curva em três partes distintas, sendo a curva de aceleração em leito fixo, onde os pontos seguiram o padrão proposto pela equação de Ergun (2.1). O mesmo comportamento foi verificado na curva de desaceleração em leito fixo. Para a região fluidizada, o leito se tornou menos estável e a flutuação dos pontos fez-se mais clara. Para obtenção da intersecção das curvas de fluidização e defluidização, foram inseridas curvas de tendência para cada uma das regiões.

3.2 COMBUSTÍVEIS

Conforme aplicação típica em leitos fluidizados borbulhantes, os combustíveis sólidos utilizados são predominantemente granulados e, conforme Basu (2006), leitos fluidizados podem operar com grande flexibilidade de combustíveis.

No atual estudo os combustíveis utilizados serão carvão mineral energético CE 4500 e serragem de madeira.

3.2.1 Carvão Mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil encontrado na natureza resultante da transformação provocada pelo tempo de grandes aglomerados vegetais como florestas soterradas a milhares de anos e sujeitas a ação de altas pressões temperaturas e ação bacteriana. A pressão, o calor e o movimento tectônico produziu a destilação de produtos gasosos de

pântanos para a formação de linhitos. A contínua atividade subterrânea motivou a redução progressiva do conteúdo gasoso dos carvões resultando em diferentes tipos de carvões que chamamos de *rank*. Dentre eles destacamos a turfa, o linhito, o carvão sub-betuminoso e o carvão betuminoso além do carvão antracito (TORREIRA, 1995).

O carvão mineral utilizado neste estudo é do tipo carvão energético CE 4500 e foi cedido pela empresa Copelmi Mineração LTDA, em janeiro do ano de 2016. A empresa forneceu ainda informações sobre o carvão que estão dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características do carvão energético Copelmi CE 4500 recebido

Característica/ Carvão Tipo	CE 4500	
	Mínimo	Máximo
Item		
Poder Calorífico Superior (b.s), kJ/kg (kcal/kg)	18410 (4400)	19246 (4600)
Umidade Total de Entrega, %	14	19
Análise Elementar		
Carbono (b.s), %	46	48
Hidrogênio (b.s), %	2,5	3,5
Nitrogênio (b.s), %	0,5	1,2
[Oxigênio + Halogênios] (b.s), %	8	10
Análise Imediata		
Cinzas (b.s), %	37	39
Matéria Volátil (b.s), %	25,5	28
Carbono Fixo (b.s), %	34	36
Enxofre Total (b.s), %	0,5	2,5

b.s. = base seca

% = g/100g

Devido ao fato da matéria prima não ter sido armazenada de maneira adequada, foram realizados novos ensaios para verificar as características mais atuais do combustível e munir de melhor confiança o estudo do combustível, evitando assim a propagação de erros associados a mudanças geradas a partir da exposição do material à intempérie.

Para a realização dos ensaios a empresa contratada utilizou os seguintes métodos: ASTM: D2013/D2013M-12: preparação de amostra e umidade total; D7582-15: umidade de higroscopia, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo por macro análise termogravimétrica, utilizando o Analisador Termogravimétrico TGA 701 da LECO Corporation; D4239-14E2: enxofre total (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica);

D 5865-13: poder calorífico superior e cálculo do inferior por bomba calorimétrica isoperibol; D5373-2014: carbono, hidrogênio, nitrogênio (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo TruSpec CHN; D3176-15: oxigênio + halogênios.

3.2.2 Biomassa

A biomassa utilizada neste estudo, objeto de doação da empresa Madeireira Capivaras Indústria e Comércio LTDA, é um resíduo de madeira obtido a partir do processamento de toras de pinus para a confecção de pranchas e tábuas de madeira em sua unidade localizada na cidade de Criciúma - SC.

Os resíduos originários da Madeireira Capivaras foram coletados diretamente da esteira de retirada de maravalhas da serra circular da empresa. Este equipamento utiliza água para refrigeração do disco de corte fazendo que a serragem saia do processo com uma umidade aumentada.

Para a realização da análise de biomassa a empresa contratada utilizou os seguintes métodos: ASTM: D7582-15: umidade de higroscopia, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo por macroanálise termogravimétrica, utilizando o Analisador Termogravimétrico TGA 701 da LECO Corporation; D 5865-13: poder calorífico superior e cálculo do inferior por bomba calorimétrica isoperibol; D4239-17: enxofre total (combustão da amostra com detecção por infravermelho); D5373-16: carbono, hidrogênio, nitrogênio (combustão da amostra com detecção por infravermelho e condutividade térmica), utilizando instrumental da LECO Corporation, modelo TruSpec CHN; D3176-15: oxigênio + halogênios.

A análise granulométrica pode ser realizada utilizando a norma DNER-ME 080/94 após um período de secagem natural do resíduo à sombra por um período de três dias e inicialmente continham desde finos (menores que 0,25 mm) até maravalhas de maior tamanho (acima de 3,36 mm).

3.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica ou termogravimetria é uma técnica de análise térmica onde o elemento analisado é submetido a condições conhecidas de temperatura em atmosfera controlada. Este ensaio é destrutivo e tem a variação da massa da amostra monitorada em função do tempo.

Foram realizadas análises termogravimétricas dos combustíveis utilizados neste estudo no Laboratório SATC (LABSATC) utilizando um TGA marca LECO Corporation, modelo 701/604100700 e aplicando o método intitulado “Carvão constante” seguindo os seguintes passos: Primeira etapa a análise da umidade de higroscopia começando em 25 °C, subindo a uma taxa de 6 °C por minuto até 105 °C e mantendo por dez minutos em atmosfera de nitrogênio insuflado a uma taxa de 5 l/min. Segunda etapa a análise de voláteis partindo de 105 °C aquecendo a uma taxa de 43 °C por minuto até 950 °C e mantendo a temperatura por sete minutos em atmosfera de nitrogênio insuflado a uma taxa de 5 l/min. E a terceira etapa para análise das cinzas tem a sua temperatura reduzida para 600 °C e aquecida a uma taxa de 15 °C por minuto até 750 °C e mantida por vinte minutos em atmosfera oxidante com oxigênio insuflado a uma taxa de 5 l/min. O ensaio encerra efetivamente quando o material analisado passa a ter perda de massa constante.

Deste modo é possível determinar utilizando este método os percentuais de umidade de higroscopia, teor de cinzas, teor de matérias voláteis e por diferença o teor de carbono fixo.

Para a realização dos ensaios a empresa contratada utilizou os seguintes métodos:

ASTM D7582-15: umidade de higroscopia, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo por macro análise termogravimétrica e ASTM D 3172-13: Prática padrão para análise imediata de carvões e coques.

3.4 COMBUSTOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Para a execução dos testes experimentais foi utilizada uma bancada de combustão com tecnologia de leito fluidizado borbulhante.

O combustor de leito fluidizado borbulhante é composto basicamente de uma câmara de combustão cilíndrica de 120 mm de diâmetro interno e altura livre de 1620 mm, confeccionado em chapa de 4 mm de aço inox AISI 310, que pertence à família dos aços inoxidáveis austeníticos. Segundo Chiaverini (2005) o aço inox AISI 310 tem boa estabilidade a temperaturas de soldagem, podendo suportar temperaturas de até 1100 °C em atmosfera oxidante.

O combustor tem em sua base um compartimento chamado de câmara plena, responsável por estabilizar o escoamento e absorver flutuações de pressão do gás de entrada, antes da placa perfurada distribuidora de ar na base inferior da câmara de combustão. A geometria da câmara plena tem igual diâmetro e altura útil de 385 mm.

Para evitar a formação de um gradiente de temperatura significativo na parede do combustor e garantir a estabilização da temperatura do sistema, um forno elétrico dividido em 3 zonas de aquecimento, com 3800 W cada, foi construído de forma a circundar o corpo cilíndrico do equipamento. A potência de projeto permite o aquecimento do forno a temperaturas próximas de 1000 °C, possibilitando também auxiliar no aquecimento inicial do sistema, no processo de partida.

A saída superior da câmara de combustão é ligada a um ciclone de separação sólido-gás do tipo Stairmand (KUNII e LEVENSPIEL, 1984) com diâmetro de referência do corpo cilíndrico de 80 mm interno, que é responsável por separar os gases de exaustão de partículas que são arrastadas pelo fluxo ascendente dos gases vindos da câmara de combustão. Na base inferior do ciclone um silo de armazenamento acumula o material particulado capturado, enquanto pela saída superior o gás purificado é expelido para a atmosfera.

O ar injetado na base do combustor de leito fluidizado é medido por um dispositivo de medição de vazão tipo rotâmetro com escala de 0-400 L/min a temperatura e pressão ambiente (21 °C e 101,3 kPa) onde é controlado por uma válvula de agulha. Após medição e controle de vazão, o ar é aquecido por um pré-aquecedor de ar elétrico com potência de projeto de 3000 W antes de ser inserido na câmara plena. O pré-aquecedor permite o aquecimento do ar propiciando temperatura ajustável a partir da condição ambiente até temperaturas próximas de 500 °C com vazões nominais a montante do pré-aquecedor de até 370 L/min.

O sistema de alimentação de combustível é provido de uma válvula do tipo alimentador helicoidal com corpo metálico montado em aço carbono e helicóide em poliamida de nome comercial *Technyl* adaptada para baixa vazão e com razoável precisão de ajuste e controle. O acionamento do alimentador é feito por um motor de corrente contínua com alimentação variável de 0-24 V que podia ser ajustado com ajuda de um regulador de tensão variável analógico.

A alimentação de combustível no reator se dá a uma altura de 400 mm a partir da placa distribuidora. Para evitar o aquecimento precoce e a possível volatilização das frações mais leves, este tubo inclinado é provido de camisa d'água, mantendo assim a temperatura adequada ao melhor desempenho do equipamento.

O distribuidor de ar localizado na base do combustor é do tipo placa perfurada e foi construído conforme metodologia proposta por Basu (2006). A placa é composta por 384 furos de 1 mm de diâmetro cada, com espaçamento entre furos de 5,5 mm e arranjo triangular. Para evitar a descida da areia pelos furos do distribuidor até a câmara plena, uma tela de inox com abertura de 200 µm foi colocada na parte superior do distribuidor.

Devido às dificuldades impostas pela manufatura dos furos da placa e a possibilidade de aços sofrerem o fenômeno de flambagem devido à variação de temperatura, optou-se pelo emprego da fibra cerâmica de sílica e alumina de nome comercial Silplate 1108 da fabricante Unifrax (Unifrax I LLC, 2015). Por fim, para o sistema de retirada de cinzas e manutenção do nível do leito, a placa foi modificada de maneira a ter um furo central por onde um dreno de diâmetro externo de 34 mm é posicionado possibilitando a variação da altura do leito e eliminação das partículas do combustor ao fim dos experimentos.

O equipamento conta ainda com 11 termopares tipo K posicionados próximos a parede do combustor, sendo 1 na câmara plena, onde é responsável pelo monitoramento da temperatura de aquecimento do ar primário, 6 termopares distribuídos na câmara de combustão, para aquisição de dados da temperatura em locais distintos do combustor, 1 termopar na saída do pré-aquecedor para o controle da temperatura de aquecimento do mesmo e 3 termopares para medição e posterior controle da temperatura das zonas de aquecimento do forno.

Pontos de tomada de pressão também estão distribuídos pela estrutura do equipamento de modo a monitorar as perdas de carga, bem como verificar a altura do leito a partir da perda de carga. A Figura 3.2 exibe o esquemático do aparato experimental.

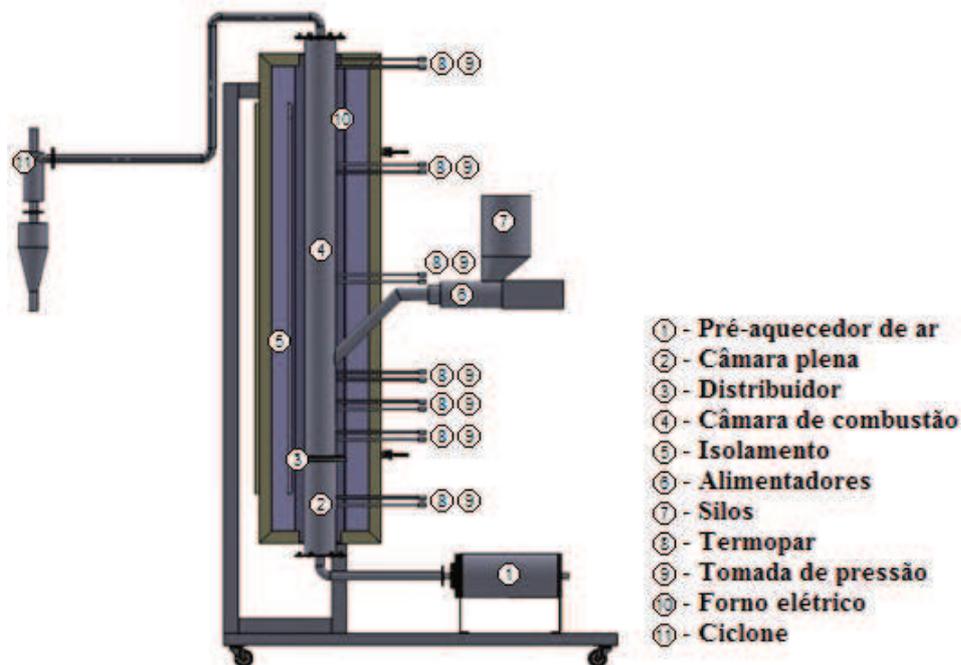


Figura 3.2– Esquemático do combustor de leito fluidizado borbulhante

Durante o processo de montagem e testes preliminares foram detectados vazamentos de gases de exaustão pelo tubo de alimentação. Este cenário induziu o aquecimento muito rápido

do tubo de alimentação e a rápida formação de encrustados devido a devolatilização e formação de óleos dificultando o escoamento dos combustíveis, principalmente as biomassas mais leves mesmo com o uso de camisa d'água. Assim optou-se pela utilização da tiragem mista de modo que o reator operasse em condições de leve depressão evitando o escoamento do gás pelo tubo de alimentação. Para tanto, utilizou-se um exaustor centrifugo marca Artek modelo EAC 1/2 MAR controlado por um inversor de frequência marca WEG CFW100.

Para o controle da pressão interna do reator, foi utilizado um manômetro de coluna d'água ligado a uma das portas de tomada de pressão do *freeboard* (zona menos densa de partículas dentro do combustor) onde foram utilizadas depressões na faixa de 5 a 20 mm de coluna de água para esta operação, de acordo com cada um dos regimes de fluidização trabalhados e suas oscilações de pressão devido as turbulências.

Para verificação dos gases de combustão foram utilizados analisadores de gases portáteis da marca ECIL modelo Chemist 500 com capacidade de detecção de O₂, CO, NO, SO₂, CO₂ e C_xH_y, além da temperatura do gás. O equipamento pode ser visualizado na Figura 3.3. As medições foram realizadas na saída de gás purificado do ciclone, onde sólidos particulados estão presentes em menor quantidade, evitando assim a saturação dos filtros dos analisadores e preservando da mesma maneira a vida útil do equipamento.



Figura 3.3 – Analisador de gases de combustão portátil Chemist 500.

Pelo fato do analisador realizar a leitura dos gases CO, NO e SO₂ em partes por milhão (ppm) e a legislação se basear na concentração medida em mg/m³ nas condições normais de

temperatura e pressão (273 K e 1 atm), utilizamos a conversão sugerida por Clarke (1998) conforme indicado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficientes de conversão das unidades dos gases (adaptado de Clarke, 1998)

Gás	Ppm para mg/m³ Multiplicar por:
CO	1,25
NO	1,34
SO ₂	2,86

3.5 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS TESTES

Para a execução dos testes de combustão, três principais parâmetros foram avaliados: o excesso de ar, a porcentagem de biomassa na mistura carvão e biomassa e o regime de fluidização empregado.

De maneira a obter termo de comparação, foram executados testes de combustão utilizando como combustível apenas o carvão mineral, variando-se o excesso de ar e o regime de fluidização. Deste modo, os gases de exaustão provenientes destes testes serviram de referência para a avaliação dos gases resultados da combustão dos combustíveis combinados.

Como material do leito (partículas inertes), foi selecionado a areia de fundição dentre os dois particulados candidatos, devido a suas características de mínima fluidização e classificação de Geldart.

O regime de fluidização indicado na matriz de teste é relativo a velocidade de mínima fluidização do leito (areia de fundição) que tipicamente ocupa quase a totalidade de todo o leito de partículas em reatores de leito fluidizado borbulhante. As vazões de ar utilizadas neste trabalho foram determinadas com o emprego dos regimes de fluidização selecionados e os excessos de ar foram obtidos para cada regime de fluidização a partir da alteração da vazão de alimentação do combustível. Deste modo foi possível fixar as velocidades de operação em termos de regime de fluidização. A Tabela 3.3 dispõe a matriz de testes a serem realizados.

Tabela 3.3 – Matriz de testes

Parâmetro	Valores
Excesso de ar [%]	50; 60 e 70
Biomassa (em massa) [%]	0; 5; 10 e 15
Regime de fluidização [umf]	3; 5 e 6
Número total de testes	36

O equipamento foi inicialmente aquecido com o acionamento das resistências elétricas do forno elétrico e inserção de ar quente com ajuda do pré-aquecedor. O aquecimento com auxílio da injeção de ar quente pela base do combustor é particularmente importante, pois colabora com o aquecimento das partículas do leito de forma homogênea. Para evitar o fenômeno de pistonamento do leito que pode ocorrer em leitos mais alongados verticalmente, a altura adotada para utilização do mesmo foi de duas vezes o diâmetro da câmara de combustão.

Assim que a temperatura no leito alcança valores em torno de 650 °C e a pressão interna do *freeboard* se encontrava estável, considerou-se a condição apropriada para alimentação de combustível. Esta temperatura foi definida a partir do ponto de ignição proposto por Garcia (2013), a partir do percentual de matéria volátil presente no combustível quando se considera a queima de carvão mineral. Ainda para garantir ignição, a faixa estipulada para início da alimentação de combustível supera muito o ponto de ignição proposto pela Figura 2.4.

As misturas de combustíveis são misturadas manualmente com ajuda de tambores, uma vez que as pequenas quantidades utilizadas por dia de teste (até 10 kg) não exigem mistura com equipamentos específicos para boa homogeneidade. Posteriormente a mistura é acondicionada no silo de alimentação onde é inserida de maneira gradual e lenta na câmara de combustão até que a taxa de alimentação do combustível atinja os valores estabelecidos na matriz de teste.

Com o sistema operando nas condições desejadas, é aguardado que a temperatura do leito se estabilize para a partir deste ponto consideramos o processo em regime permanente.

A partir do regime permanente, amostragens de gases foram realizadas na saída do ciclone. Este ponto de coleta de gás foi selecionado, pois apresenta uma zona de menor temperatura quando comparada com a câmara de combustão e tem o gás purificado com menor quantidade de material particulado devido à ação do ciclone.

Após a coleta de dados provenientes do gás e das condições de temperatura do equipamento, outro teste da matriz pôde ser realizado, porém após a alteração de parâmetros foi novamente aguardado a nova condição de regime permanente. Para a execução de cada uma das 36 variações da matriz de teste foram necessários aproximadamente 30 minutos desde a alteração dos parâmetros de alimentação, passando pelo regime transiente, aguardando a estabilização das temperaturas do leito (regime permanente) e a leitura e aquisição dos dados de composição dos gases.

Ao final de todos os testes referentes a um combustível, o dreno de regulagem de altura do leito foi aberto propiciando a saída da areia e das cinzas que se acomodaram além do volume

inicial estipulado para a operação. Devido às pequenas vazões de alimentação de combustível, não foi notado significativo aumento do nível do leito devido ao acúmulo de cinzas nos testes preliminares e deste modo não foi considerado necessário a retirada de parte do leito para a correção da altura durante a operação do equipamento.

Para a realização dos testes previstos na matriz incluindo partidas do equipamento, efetuar os testes propriamente dito e desligamentos foram necessários aproximadamente 35 horas de operação do combustor num total de mais de 60 horas de operação quando incluímos os testes preliminares, modificações e ajustes do combustor.

3.6 COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS

Para cada teste da matriz executado, três amostras de gás de combustão foram retiradas em intervalos que variaram de 3 a 5 minutos para análise dos componentes de acordo com as condições impostas pelo equipamento visando a melhor homogeneidade das amostras. O condicionamento e o tratamento dos dados serão descritos posteriormente.

Informações de temperatura ao longo do reator foram monitoradas por um software de supervisão na plataforma FieldChart NOVUS® e seus dados foram armazenados para subsequente apreciação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização da queima de um combustível base (carvão mineral) e um combustível adjunto (biomassa) simultaneamente na mesma câmara de combustão, alguns parâmetros podem ser observados quando comparados com a queima simples de carvão mineral. A partir da própria concepção, os equipamentos de leito fluidizado borbulhante permitem a execução da combustão em temperaturas mais amenas quando comparadas com outras tecnologias. Também é importante ressaltar a rápida e eficaz mistura dos materiais quentes do leito com o combustível quando este entra na câmara de reação, que, aliado a um tempo de residência adequado, sugere altas eficiências de combustão.

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados durante a execução dos trabalhos envolvidos neste estudo como a classificação e definição do material do leito, caracterização dos combustíveis, condições operacionais do combustor e análise dos dados coletados durante o processo de combustão.

4.1 ANÁLISE E DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO LEITO

Conforme indicado, foram realizados ensaios para encontrar algumas propriedades físicas das partículas pré-selecionadas para utilização nos testes. A Tabela 4.1 apresenta as principais características das partículas candidatas para serem utilizadas no leito.

Tabela 4.1 – Propriedades das partículas do leito

Tipo	Areia de fundição	Areia de filtro
Granulometria [μm]	250-350	590-1190
Massa específica real [kg/m^3]	2263	2450
Massa específica de carga [kg/m^3]	1514	1450
Diâmetro médio de Sauter [μm]	290	728
Classificação de Geldart *	B	D

*Baseado em Geldart (1979).

Aplicando a metodologia descrita para a determinação da velocidade de mínima fluidização das partículas candidatas a formar o leito foram montados gráficos de velocidade pela perda de carga e definidas as velocidades a partir da intersecção das curvas características de regime fluidizado e da defluidização (desaceleração) da velocidade do ar no leito. A Figura 4.1 apresenta um gráfico típico encontrado durante os testes realizados em temperatura ambiente.

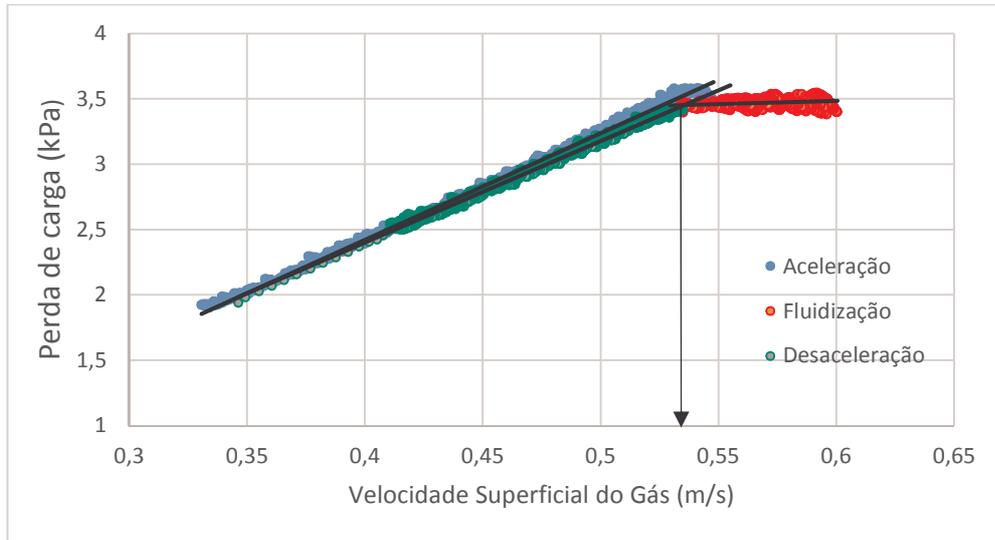


Figura 4.1 - Experimento de mínima fluidização para areia de filtro e altura de leito 0,228 m

Foram realizados ensaios em duplicata utilizando duas alturas de leito, definidas como uma e duas vezes o diâmetro do tubo do aparato experimental (valores típicos para aplicação em leitos fluidizados borbulhantes). A Tabela 4.2 apresenta as velocidades encontradas.

Tabela 4.2 – Velocidade de mínima fluidização experimental das partículas do leito

Partícula	Diâmetro médio [μm]	Altura de leito [m]	Velocidade de mínima fluidização, U_{mf} [m/s]	Desvio padrão [m/s]
Areia de Fundição	295	0,114	0,122	
		0,114	0,124	
		0,228	0,161	
		0,228	0,158	
	Média		0,141	0,0211
Areia de Filtro	728	0,114	0,488	
		0,114	0,493	
		0,228	0,535	
		0,228	0,522	
	Média		0,509	0,0226

Considerando as velocidades encontradas para as duas partículas e observando a altura do combustor em escala de bancada utilizado (1620 mm) notou-se que a velocidade de mínima fluidização da areia de filtro era muito elevada o que tornaria muito altas velocidades previstas na matriz de testes (3, 5 e 6 U_{mf}), comprometendo o tempo de residência das partículas finas que seriam muito mais facilmente arrastadas no combustor. Também foi considerado que por

pertencer ao grupo B da classificação de Geldart a areia de fundição traria melhor homogeneidade ao desempenho do equipamento. Deste modo a areia de filtro teve seu uso descartado e foi utilizado apenas a areia de fundição para a execução dos testes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Para a realização dos cálculos de estequiometria dos combustíveis e misturas utilizadas neste estudo foram realizadas as análises elementar e imediata do carvão mineral e biomassa selecionada. Também foram definidas faixas granulométricas de utilização baseado no ensaio de granulometria tendo a tomada de decisão sido feita a partir das características do equipamento como diâmetro da câmara de combustão, velocidades associadas e geometria do alimentador.

4.2.1 Caracterização do Carvão Mineral

Conforme mencionado anteriormente, a caracterização do carvão mineral foi realizada para o posterior cálculo das vazões necessárias conforme a matriz de testes estipulada. A Tabela 4.3 informa as características do carvão Copelmi CE 4500.

Tabela 4.3 – Características do carvão CE 4500

Característica/ Carvão Tipo	CE 4500
Item	
Poder Calorífico Superior (b.s), kJ/kg (kcal/kg)	19121 (4570)
Poder Calorífico Inferior (b.s), kJ/kg (kcal/kg)	18368 (4390)
Umidade Total de Entrega, %	13,45
Umidade Higroscópica, %	1,57
Análise Elementar	
Carbono (b.s), %	48,32
Hidrogênio (b.s), %	3,46
Nitrogênio (b.s), %	0,84
[Oxigênio + Halogênios] (b.s), %	8,39
Análise Imediata	
Cinzas (b.s), %	37,68
Matéria Volátil (b.s), %	28,26
Carbono Fixo (b.s), %	34,06
Enxofre Total (b.s), %	1,31

b.s. = base seca

% = g/100g

Fazendo a comparação entre a análise realizada e os parâmetros de entrega enviados pela empresa, pode-se verificar pequena discordância nos valores de carbono e matéria volátil. Os valores ficam ligeiramente acima dos limites superiores estipulados, resultando em pouca influência na utilização, sendo positivos no quesito energético. A umidade total apontou um valor menor que o limite inferior da entrega, fato que pode ser atribuído à armazenagem do combustível por algumas semanas em local abrigado. Após as análises o combustível foi armazenado em sacos plásticos e acomodado em ambiente protegido de forma a manter as características do combustível mais próximas das analisadas até sua utilização nos ensaios.

Para o dimensionamento do alimentador do combustor e posterior realização dos testes foi necessário realizar uma preparação do carvão, inicialmente recebido em tamanho grosseiro, com pedregulhos de até 50,8 mm, conforme observado visualmente. Parte do carvão foi britado em moinho de rolos e posteriormente foi realizado o ensaio granulométrico utilizando o método de ensaio DNER-ME 080/94. A Tabela 4.4 apresenta o resultado do ensaio granulométrico da amostra preparada. Nela é possível observar um significativo percentual de finos (partículas abaixo de 0,3 mm), que indica a alta friabilidade do carvão sul brasileiro, quando sujeito a processamento mecânico.

Tabela 4.4 – Granulometria do carvão mineral

Faixa granulométrica (mm)	%
< 0,3	20,30
0,3 - 0,425	6,07
0,425 - 0,59	6,00
0,59 - 1,18	24,96
1,18 - 1,68	26,44
1,68 - 2	9,29
2 - 2,36	2,90
> 2,36	4,04

Conforme testes preliminares e disponibilidade de peneiras de classificação, foi optado pela utilização da fração localizada entre os diâmetros de 0,59 e 2,00 mm, posto que frações muito finas tendem a ser mais facilmente arrastadas pelo gás de fluidização e por partículas maiores que 2,00 mm não apresentarem boa operação nos alimentadores utilizados nos testes. Os peneiramentos das amostras empregadas nos ensaios foram realizados no LABSATC utilizando um aparelho de peneiras vibratórias do tipo batelada.

Após devidamente classificado foi realizada a microscopia eletrônica de varredura do carvão para verificação das suas características geométricas. A Figura 4.2 apresenta a imagem feita do combustível.

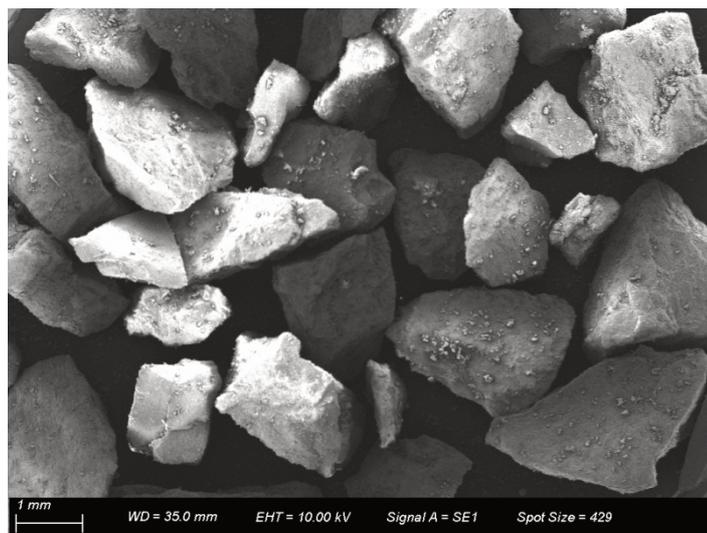


Figura 4.2 – Microscopia eletrônica de varredura do carvão CE 4500

É possível verificar uma homogeneidade relativamente boa das partículas de carvão da amostra classificada, não apresentando grãos muito alongados o que caracteriza o combustível com boa esfericidade garantindo bom escorregamento pelo tubo de alimentação inclinado até o combustor. Também é possível observar alguns finos agregados às partículas maiores que acabam por auxiliar no escoamento.

4.2.2 Caracterização da Biomassa

A análise do resíduo de pinus, conforme descrito na Tabela 4.5, mostrou que seu poder calorífico é similar ao do carvão CE 4500, apresentando, todavia, maiores teores de unidade quando comparado com o carvão mineral de referência.

Tabela 4.5 – Características da biomassa de pinus

Característica/ Biomassa	Tipo 1
Item	
Poder Calorífico Superior (b.s), kJ/kg (kcal/kg)	19550 (4670)
Poder Calorífico Inferior (b.s), kJ/kg (kcal/kg)	18190 (4345)
Umidade Total de Entrega, %	19,91
Umidade Higroscópica, %	3,54
Análise Elementar	
Carbono (b.s), %	52,44
Hidrogênio (b.s), %	6,29
Nitrogênio (b.s), %	0,04
[Oxigênio + Halogênios] (b.s), %	41,23
Análise Imediata	
Cinzas (b.s), %	n.d.
Matéria Volátil (b.s), %	87,92
Carbono Fixo (b.s), %	12,08
Enxofre Total (b.s), %	n.d.

b.s. = base seca

% = g/100g

n.d. = não detectado

Obs. Limite de detecção dos teores de cinza e enxofre são 0,01% e 0,03% respectivamente.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.6 a larga faixa de tamanhos tem sua utilização dificultada na operação do combustor devido a inconsistências com a escala de bancada do combustor, principalmente no alimentador de combustível. Deste modo optou-se pela utilização de apenas algumas faixas granulométricas descartando-se as faixas abaixo de 0,59 mm e acima de 2,00 mm, de maneira a permitir melhor operação do alimentador.

Tabela 4.6 – Granulometria da serragem de pinus

Faixa granulométrica (mm)	%
< 0,25	7,66
0,25 - 0,59	25,47
0,59 - 1,19	41,48
1,19 -1,41	6,29
1,41 - 2,00	9,11
2,00 - 3,36	9,63
> 3,36	0,36

Após devidamente classificada foi realizada a microscopia eletrônica de varredura da biomassa para verificação das suas características geométricas. A Figura 4.3 apresenta a imagem feita do combustível.

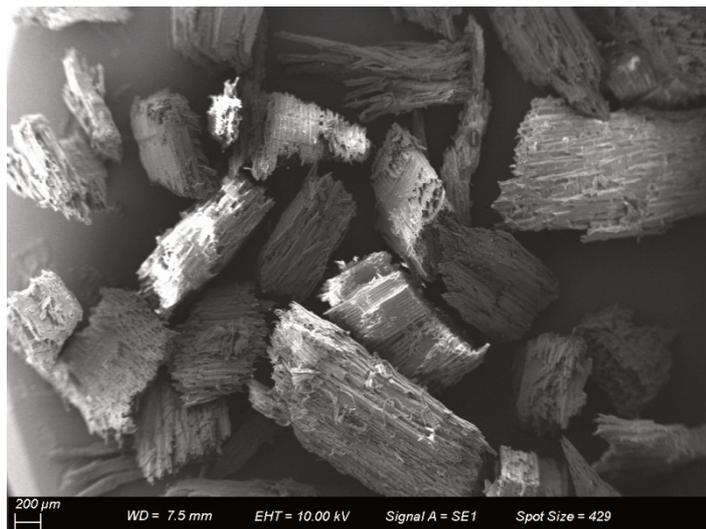


Figura 4.3 Microscopia eletrônica de varredura da biomassa

É facilmente visto que as partículas da biomassa, diferente das de carvão tem seus perfis mais alongados acompanhando as fibras que são características deste tipo de material. Por terem

sua esfericidade menor, podem indicar maior dificuldade no seu escoamento quando alimentado no tubo inclinado de entrada do combustor. Os valores de massa específica menores que o do carvão também indicam maior dificuldade no escoamento e pode sugerir complexidade na alimentação por gravidade deste tipo de combustível quando aplicado puro ou em coqueima com carvão utilizando maiores proporções de biomassa.

Por este motivo, optou-se pela utilização de até 15% em massa do percentual de biomassa na combustão combinada com carvão mineral.

4.3 TERMOGRAVIMETRIA DOS COMBUSTÍVEIS

Conforme método apresentado anteriormente, a análise termogravimétrica dos combustíveis foi realizada para determinação da composição de umidade higroscópica, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. A Tabela 4.7 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.7 – Termogravimetria dos combustíveis

Análise/Ensaio	Carvão Copelmi CE 4500 (%)	Biomassa Pinus (%)
Umidade de higroscopia	5,12	11,45
Teor de cinzas	37,68	0,35
Teor de matérias voláteis	27,45	74,32
Teor de carbono fixo	34,87	25,33

É possível notar uma variação nos valores da análise imediata principalmente da biomassa quando comparada com a da tabela característica da biomassa de pinus ressaltando a presença de cinzas neste ensaio, diminuição das matérias voláteis e o aumento do percentual de carbono fixo. Isto se deve além da influência do armazenamento das amostras, visto que os ensaios foram realizados em datas diferentes, também aos métodos utilizados por cada laboratório.

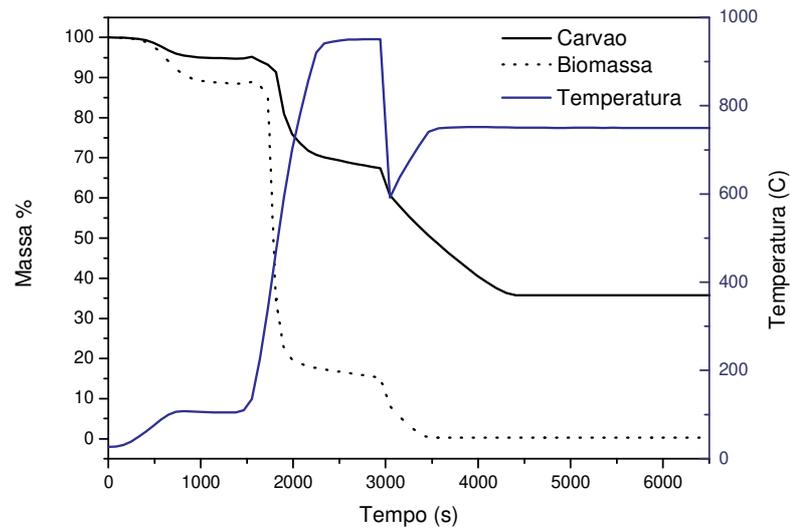


Figura 4.4 – Perda de massa dos combustíveis submetidos a análise termogravimétrica

Como consequência da análise da Figura 4.4, é possível observar a maior perda de umidade da biomassa no primeiro patamar de temperatura do forno bem como a grande diferença na perda de massa no período de perda dos voláteis. No terceiro patamar relativo a perda de carbono fixo, é possível observar que o carvão é quem mais sofre alterações na perda de massa e precisa de mais tempo para que esta etapa atinja massa constante.

Para um melhor entendimento dos fenômenos associados ao ensaio foram analisadas as derivadas das curvas termogravimétricas (DTG) dos combustíveis base conforme pode ser observado na Figura 4.5. Nela é possível depreender que durante a pirólise, a biomassa inicia a perda de água de maneira mais veloz que o carvão. O pico maior na curva derivada da biomassa infere que a reação de perda dos voláteis ocorre de maneira mais rápida que a vista na curva derivada da perda dos voláteis do carvão mineral, indicando que a difusividade e a convecção externa da biomassa é maior que a do carvão mineral.

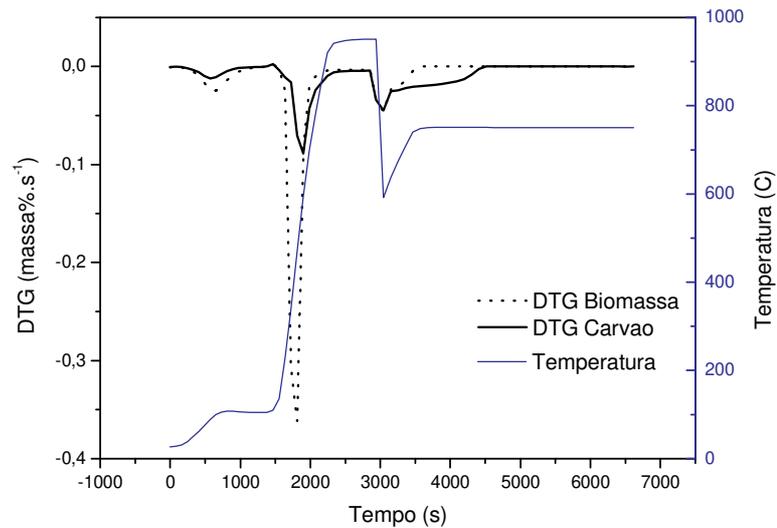


Figura 4.5 – Análise DTG das curvas termogravimétricas dos combustíveis

Já para a região de queima do carbono fixo, não foi notada significativa diferença na velocidade de reação dos combustíveis a partir do pico de queima. Entretanto o carvão necessitou de um tempo maior para que todo o conteúdo carbonoso fosse convertido em comparação com a biomassa. Desta maneira é possível verificar uma maior reatividade na combustão também da biomassa no quesito carbono fixo mesmo com maiores teores de carbono fixo no carvão mineral.

4.4 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO COMBUSTOR

Durante a execução dos testes experimentais, uma série de pontos foram observados em relação aos parâmetros de controle do equipamento. Como os experimentos foram realizados na empresa Sanchis Fornos Industriais no município de Porto Alegre – RS, algumas das utilidades como ar comprimido, eletricidade e condição ambiente, estavam condicionadas ao dia a dia da empresa.

Deste modo, por exemplo, a pressão da rede de ar comprimido que flutuava frequentemente durante a realização dos testes exigia uma frequente correção no rotâmetro de alimentação de ar para que se mantivesse constante a quantidade de ar prevista na matriz de testes.

As temperaturas do leito operaram na faixa de 800 a 860 °C nos momentos em que se considerou a operação em regime permanente e se mantinham relativamente estáveis no espaço de tempo arbitrado para cada evento indicado na matriz de testes.

Um dos pontos de maior adversidade constatado foi a intermitência da alimentação de combustível provocada pela geometria da helicóide. Durante a calibração da vazão mássica do alimentador helicoidal para cada combustível testado, foi verificado a necessidade da operação muito reduzida na velocidade de rotação do motor. Deste modo, foi optado por manejar o motor nas rotações que variavam de 0 a 1,3 rotações por minuto abrangendo as vazões definidas para operação preliminarmente. O combustível foi inserido no reator a uma altura de 200 mm acima do leito de partículas, que em função da expansão promovida pela fluidização e suas variações acarretaram na diminuição em até 100 mm esta distância.

Pelo fato do alimentador helicoidal ter comportamento intermitente e as velocidades de rotação serem relativamente baixas, foi observado a variação na taxa de alimentação do combustível, fator que se apresentou bastante claro nas medições principalmente do monóxido de carbono e temperatura na zona do *freeboard* do reator.

A Figura 4.6 apresenta o perfil típico das temperaturas ao longo do combustor durante um dos períodos de regime permanente (combustível com 15% de biomassa, 3 umf e 50% de excesso de ar).

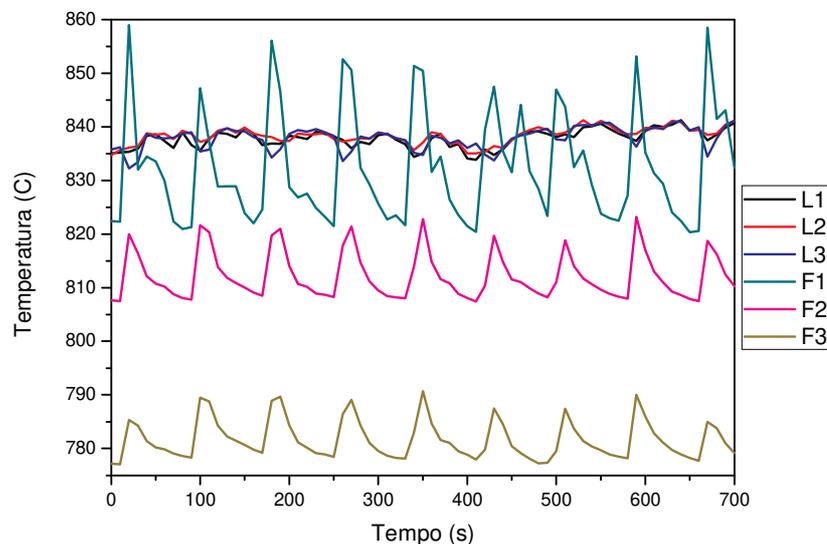


Figura 4.6 – Perfil típico das temperaturas no combustor

Onde o termopar L1 está posicionado no leito 75 mm acima do distribuidor, o termopar L2 no leito 200 mm acima do distribuidor, o termopar L3 no topo do leito expandido 320 mm acima do distribuidor, o termopar F1 no *freeboard* 720 mm acima do distribuidor, o termopar F2 no *freeboard* 1170 mm acima do distribuidor e o termopar F3 no topo do *freeboard* 1600 mm acima do distribuidor.

A partir da análise da Figura 4.6 é possível observar a estabilidade das temperaturas nos termopares inseridos dentro da região mais densa de partículas (L1, L2 e L3) onde se encontrava o leito fluidizado. O leito de areia tem uma inércia térmica maior que as regiões mais diluídas e não tem a sua temperatura significativamente alterada pela intermitência da alimentação. A posição L1 e L2 têm temperaturas muito similares e a temperatura L3, localizada no topo do leito na fronteira entre a zona densa e a zona diluída, sofre uma pequena flutuação para baixo, provavelmente provocada pelo efeito da maior quantidade de combustível frio que adentra o equipamento se colocando no topo do leito até que o combustível ganhe temperatura.

O termopar F1 é o dispositivo de medição de temperatura mais próximo do leito que está na região do *freeboard*, além de contar com temperaturas levemente mais amenas que a zona de combustão (posição L3) e do leito, sofre significativa variação de temperaturas provocadas pela intermitência do alimentador. É possível observar que quando uma porção maior de combustível é liberada pelo alimentador, os voláteis que tem a sua queima realizada de forma muito rápida, aquecem rapidamente a zona mais baixa do *freeboard*, provocando o efeito pulsante na temperatura da posição F1.

Podemos observar também na Figura 4.6 que a curva do termopar F1, fortemente alterada pela intermitência do alimentador, apresenta ciclicamente um primeiro pico maior que conforme verificado na análise das curvas derivadas dos ensaios termogravimétricos se deve a liberação dos voláteis no primeiro momento e é seguido por um segundo pico de menor intensidade que podemos relacionar a queima do carbono fixo também apresentada na Figura 4.5.

As posições F2 e F3 localizadas no meio e topo do *freeboard*, acompanham a flutuação da temperatura notada pelo termopar F1 de maneira mais suave, demonstrando que a queima dos voláteis se concentra na região próxima à da alimentação (400 mm acima do distribuidor).

É possível observar também uma sensível diminuição da temperatura na posição F3 (topo do combustor) que deve ter sido motivada pela perda de temperatura das partes metálicas expostas ao ambiente sem isolamento e o forno para manutenção da temperatura.

4.4.1 Análise das Cinzas por Perda ao Fogo

Apenas para a verificação indicativa da qualidade da combustão das misturas, amostras de cinzas retiradas do ciclone foram avaliadas a partir da análise de perda ao fogo. No total, 4 amostras foram ensaiadas, sendo que cada amostra corresponde a um tipo específico de combustível. Foram homogeneizadas as cinzas do ciclone provenientes da queima de um tipo

singular de combustível, independente do regime de operação ou condição de excesso de ar, antes da execução dos ensaios. A metodologia para a execução foi baseada na ASTM C25-17: Métodos padrão de teste para análise química de calcário, cal viva e cal hidratada. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.8 – Análise de perda ao fogo das cinzas

Fração de biomassa (%)	Perda de massa (%)
0	1,44
5	1,10
10	1,05
15	1,29

Como consequência dos resultados encontrados no ensaio de perda ao fogo, é possível verificar uma ótima conversão do combustível durante as operações das 4 misturas de combustível devido a pequena variação da perda de massa. Isso demonstra que as condições empregadas na matriz de testes foram adequadas para os combustíveis utilizados quando aplicada a combustão utilizando leito fluidizado borbulhante.

Não houve significativa mudança de concentração de carbono nas cinzas quando incrementada a fração mássica de biomassa no combustível e isso sugere que mesmo com menor massa específica, as partículas arrastadas de biomassa tiveram tempo de residência grande suficiente para proporcionar uma boa conversão do carbono.

4.5 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL NAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Neste tópico foram avaliados os resultados encontrados durante a execução dos testes para os gases CO₂, CO, NO_x, C_xH_y e SO₂.

4.5.1 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de CO₂

A concentração de CO₂ nos gases de exaustão normalmente é associada à eficiência e qualidade da combustão. Deste modo, um perfil de aumento das suas concentrações é esperado quando são melhoradas as condições de operação como melhor mistura (turbulência), temperatura adequada e excesso de ar maior. A Figura 4.7 apresenta os resultados de concentração de CO₂ encontrados durante a realização dos ensaios.

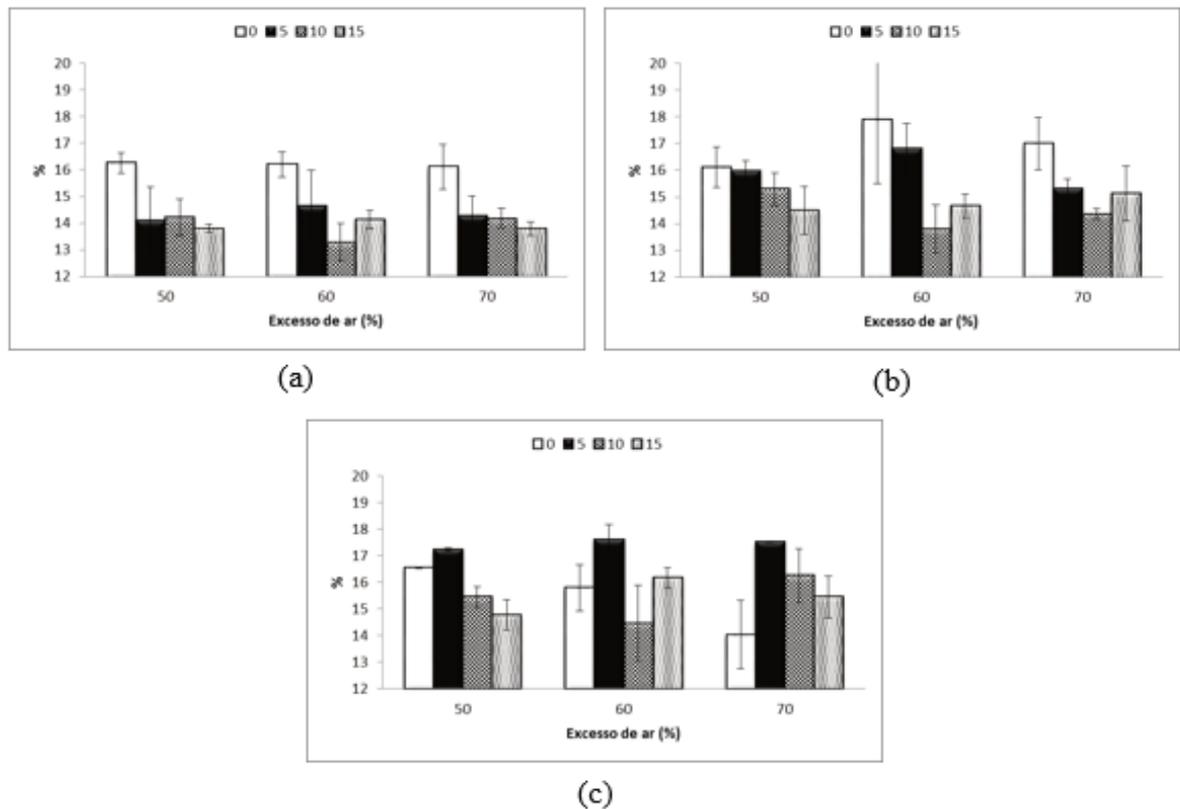


Figura 4.7 – Influência da biomassa nas emissões de CO₂ corrigido para 7% de O₂: a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

Apesar das diferenças nas concentrações de CO₂ a partir do incremento da biomassa no sistema não ultrapassarem de 2 a 3 %, observa-se uma tendência de diminuição da concentração de CO₂ quando se aumenta a proporção de biomassa e utilizam-se velocidades de operação mais amenas (3 e 5 umf). Uma das possíveis razões para este comportamento é um arraste do gás de combustão sem uma conversão completa dos voláteis liberados pela biomassa que possui um maior teor destes componentes (maior que 74%).

Com aumento da velocidade superficial do ar (6 umf), uma menor tendência a diminuição nas concentrações em relação a quantidade de biomassa foi observada.

Ainda para o regime de fluidização de 6 umf, quando utilizado combustível sem mistura de biomassa foi observada uma tendência a diminuição da concentração de CO₂, fato que pode ser relacionado também ao menor tempo de residência associado aos maiores excessos de ar.

4.5.2 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de CO

O monóxido de carbono juntamente com o dióxido de carbono também é amplamente utilizado para a análise qualitativa da eficiência e qualidade da combustão. Este gás tem suas concentrações limitadas por legislação ambiental e seu controle se faz necessário para o cumprimento legal. A Figura 4.8 apresenta os dados de CO adquiridos durante a execução dos experimentos.

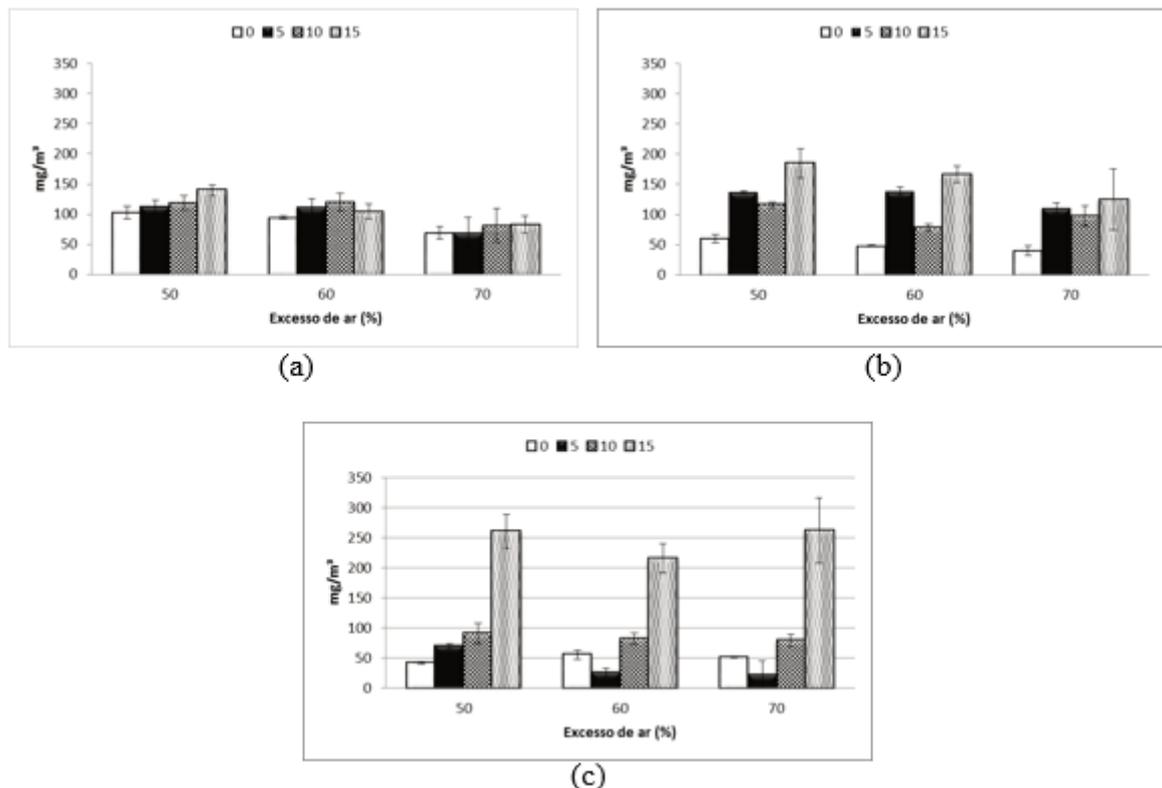


Figura 4.8 – Influência da biomassa nas emissões de CO corrigido para 7% de O₂: a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

De maneira geral pode-se verificar uma baixa concentração de CO em todos os testes, apontando que o sistema testado pode ser aplicado para processos de coqueima. O inverso do comportamento da concentração de CO₂ foi observado em relação ao CO, ou seja, conforme ocorreu um aumento da proporção de biomassa no combustível, maiores foram as concentrações de CO obtidos, confirmando que não deve ocorrer a oxidação completa dos voláteis da biomassa na região do *freeboard*.

Em se tratando da mistura de combustível com 15% de biomassa, o aumento da velocidade de fluidização acarreta em uma ineficiência de conversão do CO principalmente a

partir de 6 umf e, portanto, uma concentração máxima de 10% de biomassa se mostra como limite indicado para a operação neste regime de fluidização.

Quando utilizada a resolução 016/2014 do SEMA que trata das emissões de CO para unidades geradoras de calor acima de 100 MW de potência nominal, os limites ficam em 250 mg/m³ de CO. Deste modo apenas os testes utilizando 15% de biomassa como combustível e com o regime de fluidização de 6 umf apresentou concentrações acima dos limites estabelecidos pela legislação. Para escalas menores que 100 MW de potência nominal, que permitem emissões de CO de até 500 mg/m³ não é necessário nenhum dispositivo de controle de emissões de CO para os casos experimentados.

4.5.3 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de NO_x

Os óxidos de nitrogênio são encontrados em gases de exaustão de caldeiras e combustores na indústria. Apesar de ter 3 rotas de formação (NO_x combustível, NO_x térmico e NO_x imediato), devido a composição dos combustíveis utilizados e a tecnologias aplicadas neste estudo, as concentrações de NO_x medidas podem estar mais relacionadas com o mecanismo a partir do combustível. Foram medidas concentrações de NO utilizando os analisadores de gases e admitido uma concentração 5% maior do NO para o total de NO_x formado.

A Figura 4.9 apresenta as concentrações de NO_x encontradas nos testes realizados.

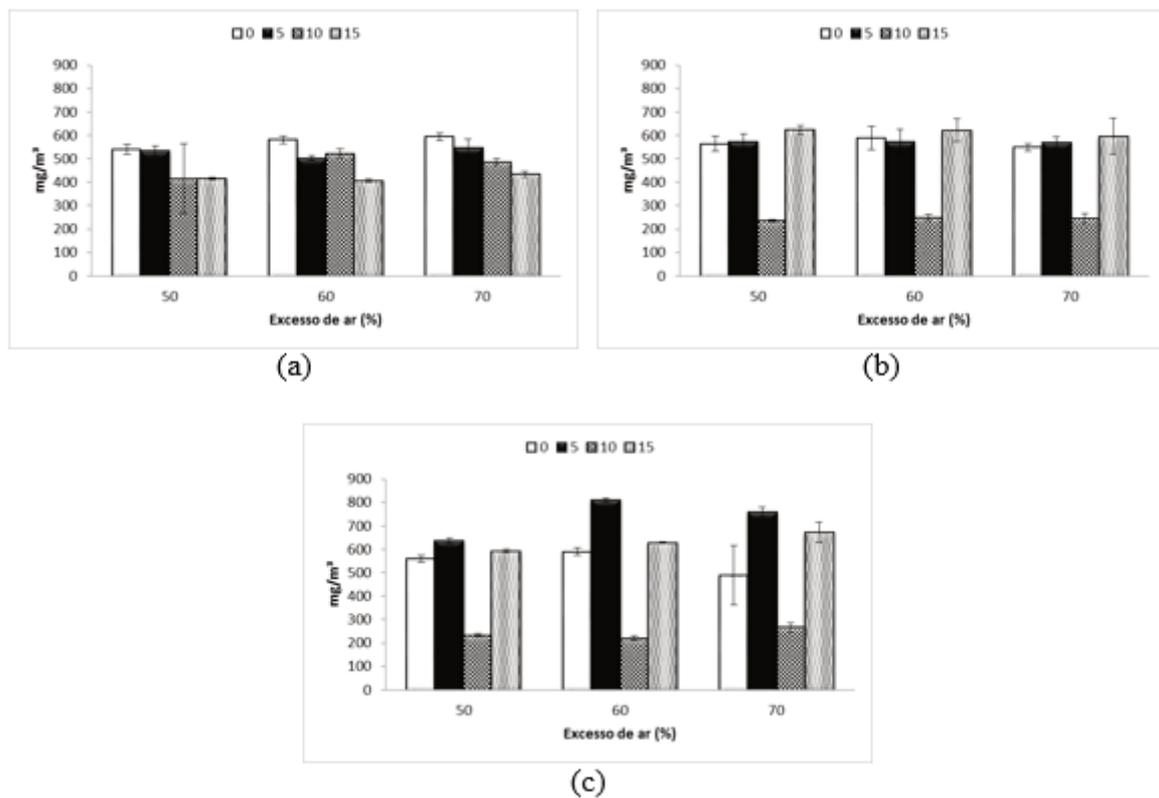


Figura 4.9 – Influência da biomassa nas emissões de NO_x corrigido para 7% de O_2 : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

Para o combustível com 0% de biomassa não foi verificada significativa variação das concentrações de NO_x quando modificados os regimes de fluidização e os excessos de ar. É possível observar que para a fluidização mais branda (3 umf) uma pequena tendência a diminuição da formação do NO_x foi notada quando foi aumentada a fração mássica de biomassa na mistura de combustível. Já para as condições de fluidização de 5 e 6 umf, não foi apresentada uma variação tendenciosa na concentração do poluente. Nestes mesmos regimes de fluidização, para misturas de 15% de biomassa foi verificado um leve aumento nas concentrações em comparação a queima singular de carvão que pode ser associado às temperaturas superiores de operação deste combustível aliado ao mecanismo de formação do NO_x térmico. Não foram verificadas mudanças relevantes nas concentrações em função da oscilação do excesso de ar nos testes.

Em se tratando de legislação ambiental a resolução 016/2014 do SEMA considera até 400 mg/m³ os limites de emissões para unidades acima de 100 MW e 500 mg/m³ para unidades entre 10 e 100 MW, não sendo aplicável para unidades menores que 10 MW de potência nominal. Deste modo, a grande maioria dos testes realizados, aponta a necessidade da utilização

de sistemas de controle de emissões de NO_x , podendo ser utilizados os sistemas de redução catalítica seletiva ou sistemas de redução catalítica não seletiva, por exemplo.

4.5.4 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de C_xH_y

Os C_xH_y , são cadeias de hidrocarbonetos que se formam durante as reações de pirólise e queima de combustíveis. A presença de C_xH_y nos gases de exaustão, assim como o CO são indicadores da oxidação incompleta dos combustíveis. A Figura 4.10 exibe os resultados das concentrações de C_xH_y encontrados durante a execução dos testes.

Assim como no comportamento do CO, a concentração de componentes C_xH_y tendem a aumentar com o aumento da fração mássica de biomassa na combustão. Sua concentração aumentou principalmente quando se operou com velocidades superficiais mais elevadas (5 e 6 umf), fato que pode ser atribuído a diminuição do tempo de residência dos compostos de C_xH_y no reator. Contudo, o comportamento do carvão puro apresentou comportamento diverso, reduzindo a concentração de C_xH_y com o aumento da velocidade superficial, provavelmente devido ao menor teor de voláteis do carvão.

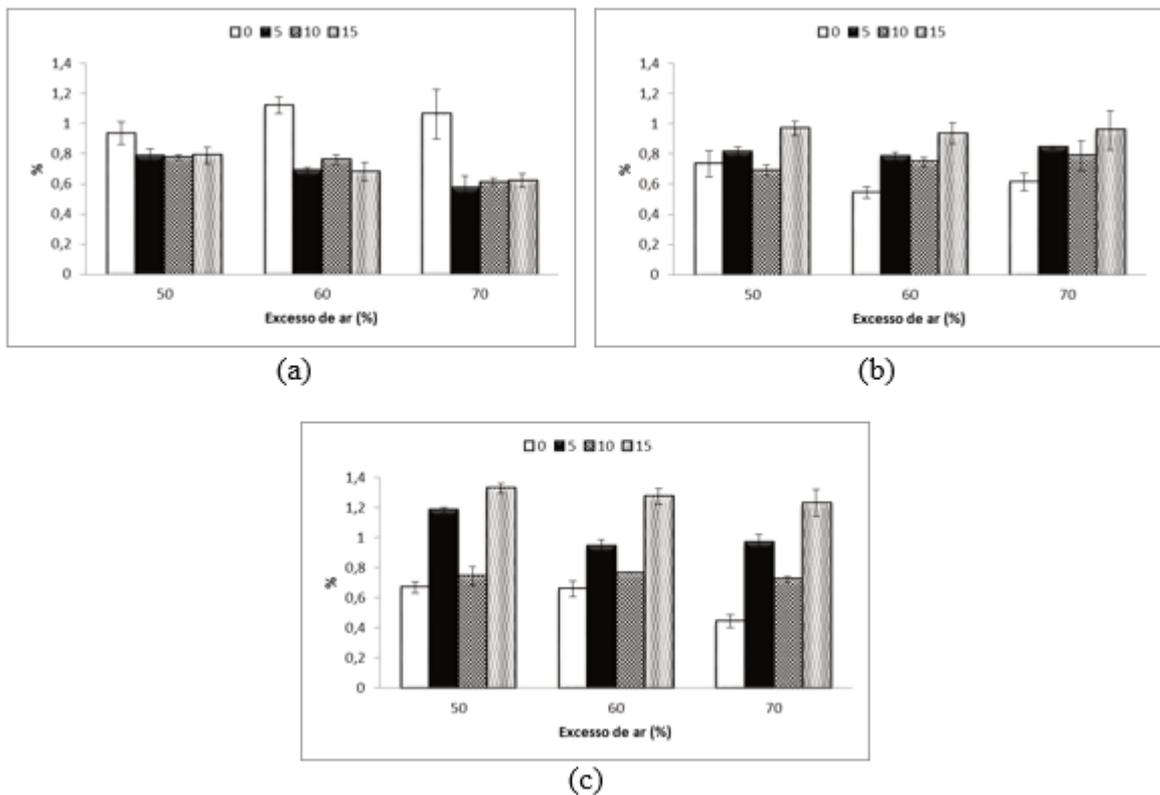


Figura 4.10 – Influência da biomassa nas emissões de C_xH_y corrigido para 7% de O_2 : a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

Apesar do comportamento da presença dos hidrocarbonetos com a variação do combustível e dos regimes de fluidização, suas concentrações podem ser atribuídas as temperaturas adequadas ao craqueamento, à boa transferência de calor e massa e ao tempo de residência apropriado, que são típicos em combustores de leito fluidizado borbulhante. Deste modo, a presença de alcatrão, que muitas vezes é tida como temerosa na operação de alguns equipamentos como os combustores e gaseificadores, não se apresenta como fator problemático.

4.5.5 Influência da Presença de Biomassa nas Emissões de SO₂

Os compostos de enxofre foram avaliados com a variação do percentual de mistura de biomassa no combustível e pode ser observado na Figura 4.11.

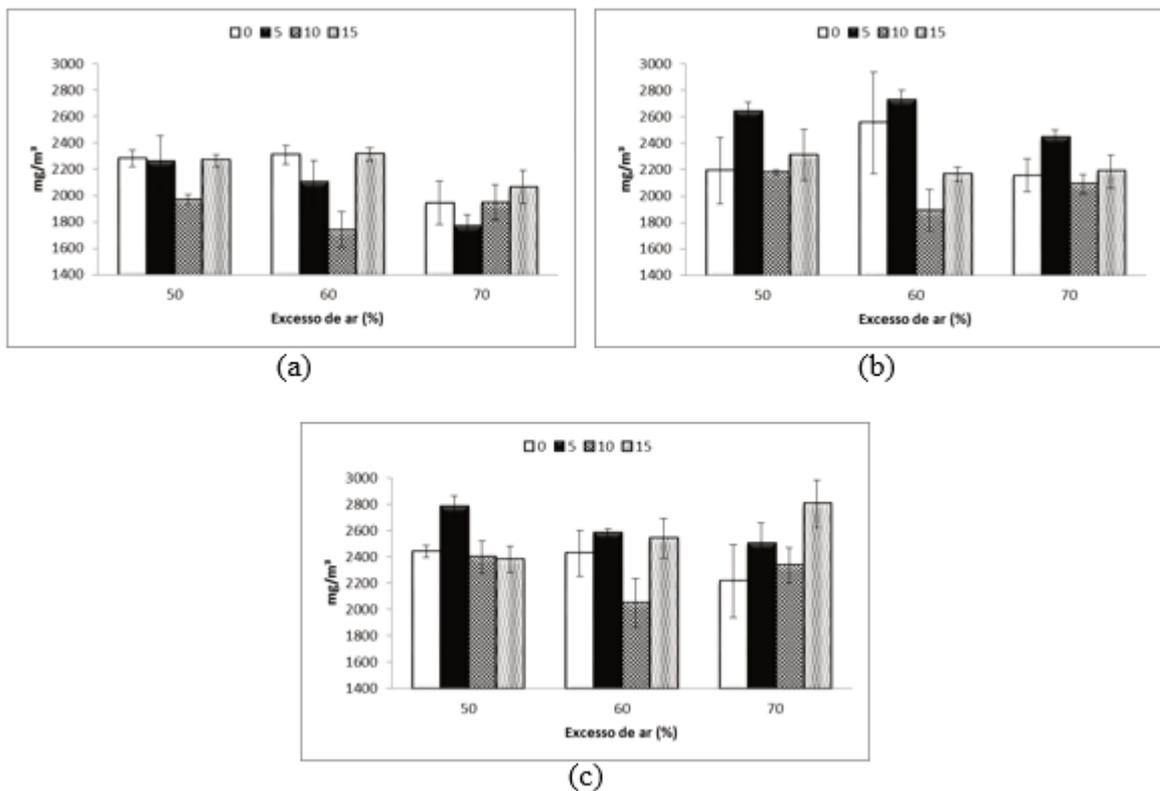


Figura 4.11 - Influência da biomassa nas emissões de SO₂ corrigido para 7% de O₂: a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

A partir da avaliação dos dados de concentração, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre as concentrações de SO₂ e a proporção de biomassa empregada na combustão. Entretanto, em alguns casos como o da queima singular de carvão observa-se uma

leve inclinação à diminuição das concentrações de SO_2 com o incremento do excesso de ar. Já para as misturas com biomassa esta tendência não é claramente sentida especialmente com as misturas mais ricas em biomassa.

Quando observado o efeito do regime de fluidização para cada mistura, é possível identificar um aumento nas concentrações de SO_2 diretamente ligadas ao aumento das velocidades de fluidização utilizadas. Aparentemente o aumento das condições de turbulência interferiu para o aumento da formação deste componente.

Conforme esperado, o aumento no percentual de até 15% em massa de biomassa (que contém aproximadamente 0% de enxofre) não foi significativo para influenciar as emissões de SO_2 quando comparado com a queima singular de carvão (que contém aproximadamente 1,31% de enxofre) quando utilizado os analisadores de gases em questão. De qualquer modo, as emissões de SO_x superam os limites estabelecidos pela resolução 016/2014 do SEMA (até 1300 mg/m^3) quando utilizadas unidades maiores que 50 MW de potência nominal exigindo a utilização de dessulfurizadores de gases ou ainda a remoção utilizando a aplicação direta de calcário junto com o combustível no reator. Para unidades entre 10 e 50 MW de potência nominal, os limites do SEMA são mais amplos (até 3000 mg/m^3) o que permite a aplicação dos combustíveis testados sem a necessidade de remoção de óxidos de enxofre dos gases de exaustão.

4.6 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL NAS TEMPERATURAS OBSERVADAS NO LEITO

As temperaturas de operação dos equipamentos são fatores decisivos na aplicação e utilização do calor. A operação em temperaturas brandas oferece segurança quanto ao amolecimento das cinzas evitando o colapso da fluidização do leito. A Figura 4.12 apresenta o perfil de temperaturas do leito em função dos combustíveis e condições utilizadas.

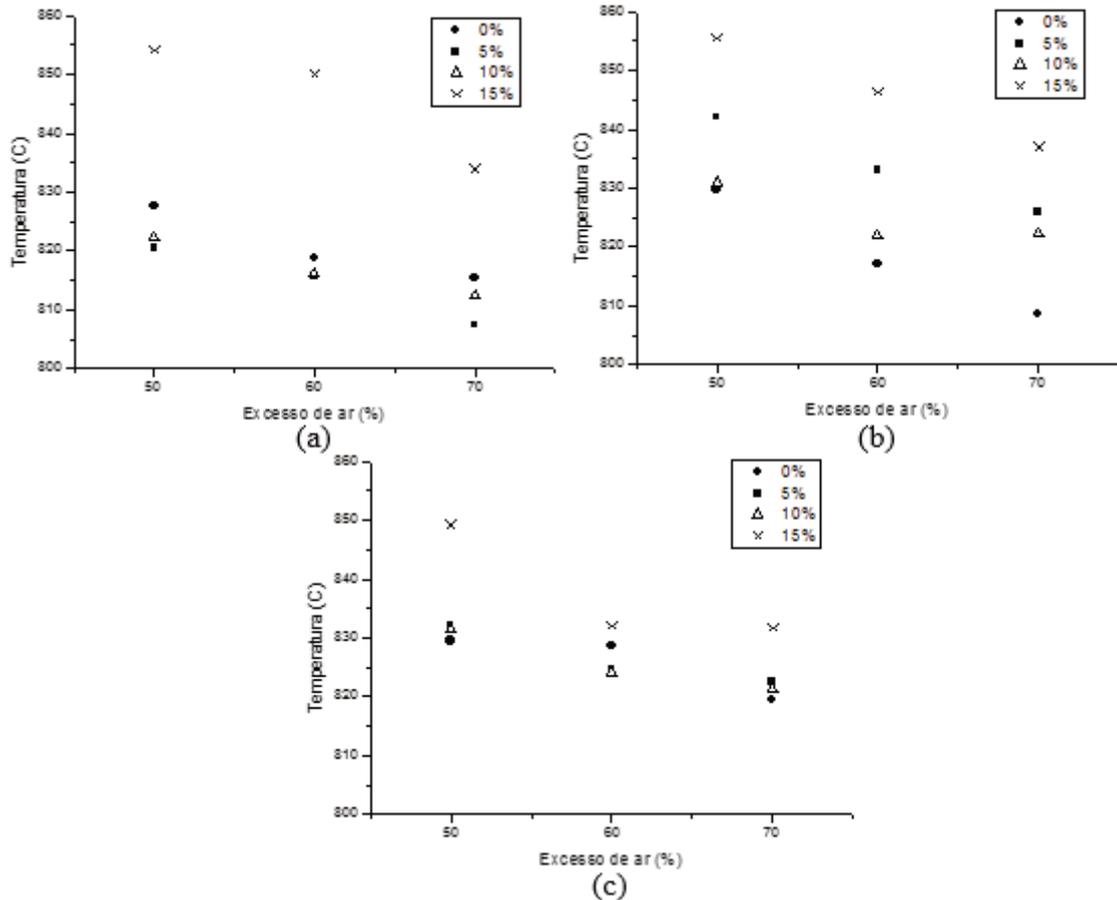


Figura 4.12 – Temperatura do leito função do combustível: a – 3 umf, b – 5 umf, c – 6 umf

Conforme esperado, um aumento na fração mássica de biomassa na mistura reflete em uma elevação da temperatura média do sistema conforme pode ser observado a partir da temperatura média do leito no regime permanente de operação. Isso é ocasionado principalmente pelas altas concentrações de material volátil e carbono fixo presentes na biomassa quando comparado com o do carvão mineral brasileiro utilizado o qual possui uma alta concentração de material mineral inerte (cinzas).

De modo geral, é possível verificar uma menor diferença de temperatura do leito quando operado a maior velocidade de fluidização (6 umf) provocado provavelmente pela maior turbulência e melhor mistura.

Com o aumento do excesso de ar, a temperatura do sistema seguiu um declínio esperado. Esta diminuição está relacionada com o maior volume de ar inserido no combustor a uma temperatura de entrada mais baixa que a do leito. Mesmo com maior disponibilidade de oxigênio para as reações de oxidação que liberam energia, a massa de nitrogênio que atravessa o sistema, e mesmo a de oxigênio, que não reagem são aumentadas e mais energia é retirada do sistema diminuindo as temperaturas.

Pode-se concluir que todos os regimes de operação permitiram operação estável do equipamento em função da homogeneidade das temperaturas principalmente com misturas contendo até 10% de biomassa.

O desvio padrão da média maior das temperaturas para a mistura com 15% de biomassa no regime de fluidização de 6 umf indica uma maior dificuldade de operação estável do sistema para esta condição.

4.7 FLUTUAÇÃO DE TEMPERATURA DO *FREEBOARD* EM FUNÇÃO DA INTERMITÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

Conforme apresentado na Figura 4.13, foram inseridos em um gráfico os valores de desvio padrão das médias de temperatura do termopar F1 localizado a 720 mm do distribuidor de ar. Nele, conforme descrito anteriormente, foi notado uma sensível flutuação da temperatura em função do desprendimento e queima dos voláteis na região mais inferior do *freeboard*. Deste modo, analisando a flutuação através do desvio padrão das temperaturas deste termopar durante a operação, foi possível avaliar a dispersão das temperaturas em torno da média de temperatura naquela região.

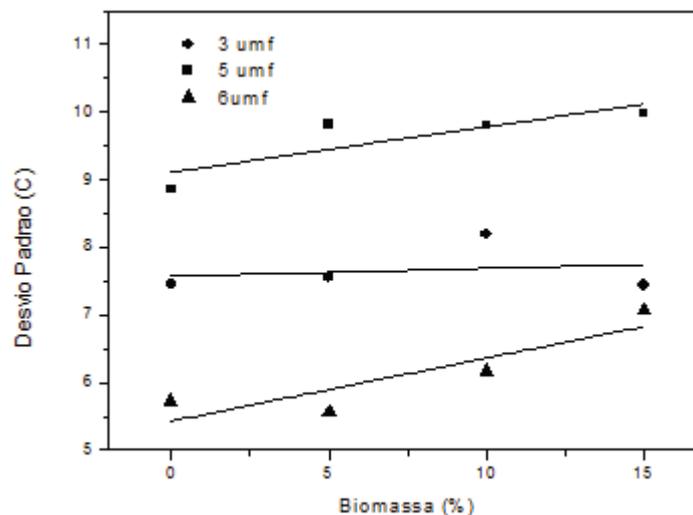


Figura 4.13 – Análise da flutuação de temperatura do termopar F1 a partir do desvio padrão

Pode-se verificar que, independente do regime de fluidização aplicado, há uma tendência de o desvio padrão aumentar quando também é progredida a fração mássica de biomassa na mistura de combustível. Assim, novamente é constatado que a influência do alto teor de voláteis presente na biomassa acarreta em maiores instabilidades das temperaturas do

sistema quando o dispositivo de alimentação de combustível apresentar significativa intermitência na sua operação.

5 CONCLUSÃO

Com a conclusão dos testes e avaliação dos dados foi possível determinar que com a areia de fundição o leito se comportou de maneira satisfatória sendo possível a boa operação do equipamento em todos os regimes e condições de testes avaliados, principalmente com misturas de combustível contendo até 10% de biomassa. As granulometrias utilizadas tanto da areia quanto dos combustíveis permitiram boa eficiência de combustão, pouco arrasto de finos e cinzas com pequenos percentuais de material não convertido, conforme confirmação a partir da análise de perda ao fogo das cinzas do ciclone. A cinza pesada presente no leito ao fim dos testes indicou boa conversão a partir da coloração da mesma, muito semelhante as cinzas encontradas em leitos fluidizados borbulhantes que utilizam carvão brasileiro.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura dos combustíveis indicaram uma melhor homogeneidade e esfericidade das partículas de carvão em comparação com as partículas de biomassa. As imagens sugerem que a biomassa pode apresentar problemas de escoamento dos silos e alimentação quando a mistura de combustível apresentar quantidades maiores de biomassa ou mesmo quando utilizada apenas biomassa.

Durante a operação do equipamento, a intermitência na alimentação de combustível foi um parâmetro que influenciou muito a operação e retirada de dados do sistema. As oscilações das temperaturas principalmente na zona do *freeboard* indicou uma flutuação da quantidade de compostos voláteis sendo queimados nesta parte do equipamento. Diferentemente, o leito teve suas temperaturas pouco afetadas pela intermitência na alimentação de combustível devido a maior inércia térmica relativa aos sólidos particulados que compunham o leito.

Pela maior disponibilidade de compostos voláteis presentes na biomassa aliado à rápida queima destes compostos, foi possível verificar maior flutuação do *freeboard* quando aumentada a fração de biomassa no combustível utilizado. A análise termogravimétrica dos combustíveis comprovou este ponto uma vez que a biomassa apresentou mais rápida reatividade para perda de água, queima do carbono fixo e principalmente a liberação dos voláteis.

Conforme esperado, o aumento do excesso de ar resultou na queda das temperaturas do sistema. Ainda em termos de temperatura, um aumento da fração mássica de biomassa na mistura de combustível refletiu na elevação da temperatura média do sistema. Este fato deve estar associado principalmente com o maior percentual de material inerte presente no carvão mineral, uma vez que os dois combustíveis utilizados têm poderes caloríficos equivalentes. A melhor mistura e maior turbulência disponível quando utilizado o regime de fluidização de 6

umf, apontou para uma menor diferença nas temperaturas do leito quando foi variada a mistura de combustível.

Em termos de emissões, as concentrações de CO₂, CO e C_xH_y apontam para uma boa conversão das misturas de combustíveis utilizadas, sendo que as concentrações de CO e C_xH_y sofreram um leve aumento nas concentrações quando foram utilizadas misturas mais ricas em biomassa, possivelmente provocadas pela conversão incompleta dos voláteis, uma vez que pouco incombusto foi identificado nas cinzas amostradas no ciclone. Apenas os testes utilizando 15% de biomassa no combustível e regime de fluidização de 6 umf apresentou concentrações de CO acima dos limites estabelecidos pela SEMA 016/2014. As emissões de C_xH_y mesmo não sendo controlada por legislação para combustores, não se apresentou com concentrações significativas para ser relevante a questão do alcatrão.

Para o regime de fluidização de 3 umf as emissões de NO_x tiveram uma pequena tendência de diminuição quando aumentada a fração mássica de biomassa no combustível, fato que não foi observado para os regimes de fluidização de 5 e 6 umf. O Excesso de ar não apresentou variações relevantes nas concentrações deste poluente. A grande maioria dos testes realizados aponta a necessidade da utilização de sistemas de controle de emissões de NO_x, podendo ser utilizados os sistemas de redução catalítica seletiva ou sistemas de redução catalítica não seletiva.

Em termos de emissão de SO₂ não foi possível estabelecer uma correlação direta entre o aumento do percentual de biomassa no combustível e a emissão de SO₂. O aumento no percentual de até 15% em massa de biomassa (que contém aproximadamente 0% de enxofre) não foi significativo para influenciar as emissões de SO₂ quando comparado com a queima singular de carvão (que contém aproximadamente 1,31% de enxofre) quando utilizado os analisadores de gases Chemist 500. As emissões de SO_x superam os limites estabelecidos pela SEMA 016/2014 para unidades maiores que 50 MW de potência nominal exigindo o tratamento dos gases de exaustão ou ainda a aplicação de calcário diretamente no leito, conforme possibilita a tecnologia de leito fluidizado borbulhante.

A queima combinada de carvão mineral brasileiro com biomassa de maravalha de pinus se apresenta como potencial solução para a minimização dos gases de efeito estufa com boa operacionalidade e controle para concentrações de até 10% de biomassa na mistura e regimes de fluidização de até 6 umf, necessitando apenas de dispositivos triviais de controle de NO_x e SO_x para o cumprimento da legislação.

Como sugestões para trabalhos futuros é importante o estudo e desenvolvimento de um alimentador de combustíveis sólidos mais adequados para a escala de estudo, de modo a

permitir uma melhor homogeneidade da alimentação possibilitando a melhor operação do equipamento com menores flutuações na concentração dos gases emitidos. Deste modo uma avaliação mais precisa dos efluentes gasosos permitirá melhor ponderação das misturas combustíveis convertidas no equipamento.

REFERÊNCIAS

- AHO, Martti; ENVALL, Tapio; KAUPPINEN. Corrosivity of Flue Gases During Co-firing Chinese Biomass With Coal at Fluidized Bed Conditions. **Fuel Processing Technology**, v.105, p.82-88, 2011.
- ANNAMALAI, Kalyan; PURI, Ishwar K. **Combustion Science and Engineering**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C25-17**: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime. West Conshohocken, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D2013/D2013M**: Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis. West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D3172**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D3176**: Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D4239**: Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using high temperature Tube Furnace Combustion. West Conshohocken, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D5373**: Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D5865**: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D7582**: Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis. West Conshohocken, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8630**: Carvão Mineral - Determinação da Densidade de Carga. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9745**: Coque - Determinação de Massa Específica Real. Rio de Janeiro, 1987.
- AYSEL, Atimtay T; KAYAHAN, Ufuk; UNLU, Alper; ERGIN, Berrin; VAROL, Murat; OLGUN, Hayati; ATAKUL, Husnu. Co-firing of Pine Chips With Turkish Lignites in 750 kWth Circulating Fluidized Bed Combustion System. **Bioresearch Technology**, v. 224, p. 601-610, 2017.
- BASU, Prabir. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- BIANCHI, Flavio M; AQUINO, Thiago F. de; KESTERING; Daniel A; DALPONT, Giovana; MARCELLO, Reginaldo R; NETO, João M; INDRUSIAK, Maria L. S; ZINANI, Flávia; WANDER, Paulo R. Bancada Experimental para Estudos de Fluidização de Combustíveis Sólidos em Sistemas de Leito Fluidizado Circulante. **Anais do 4º CBCM**, Gramado, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 436**, de 22 de dezembro de 2011. In: Resoluções 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em 14. dez. 2016.

CARVALHO, João A. de; MCQUAY, Mardson Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CLARKE, Andrew G. **Industrial Air Pollution Monitoring**. London: Chapman & Hall, 1998.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 2005.

COLLOT, Anne G, 2006. Matching gasification technologies to coal properties. **International Journal of Coal Geology**, v.65, p. 191-212, 2006.

CREMASCO, Marco A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

DARMAWAN, Arif; BUDIANTO Dwika; AZIZ Muhammad; TOKIMATSU Koji. Cofiring Assessment of Hydrothermally-Threated Empty Fruit Bunch and Low Rank Coal in a Drop Tube Furnace. **Energy Procedia**, v.105, p. 1545-1550, 2017.

FOUST, Alan S; WENZEL, Leonard A; CLUMP, Curtis W; MAUS, Louis; ANDERSEN, Bryce L. **Princípio das operações unitárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

GELDART, Derek. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v.7, p. 285-292, 1973.

GOGEBAKAN, Zuhai; GOGEBAKAN, Yusuf; SELÇUK, Nevin. Cofiring of Olive Residue With Lignite in Bubbling FBC. **Combustion Science and Technology**, v.180, p. 854-868, 2008.

GRACE, John R.; AVIDAN, Amos A.; KNOWLTON, Ted M. **Circulating Fluidized Beds**. New York: Blackie Academic & Professional Londres, 1997.

KUNII, Daizo; LEVENSPIEL, Octave. **Fluidization Engineering**. 2 ed. Newton (MA): Butterworth-Heinemann, 1991.

EL-MAHALLAWY, Fawzy; HABIK, Saad E. **Fundamentals and Technology of Combustion**. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2002.

MILLER, Bruce G.; TILLMAN, David A. **Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems**. Burlington, MA: Academic Press, 2008.

JONES, Jenny M; ROSS, Andrew B; MITCHELL, Edward J. S; LEA-LANGTON, Amanda R; ALAN, Alan; BARTLE, Keith. Organic Carbon Emissions from the Co-firing of Coal and Wood in a Fixed Bed Combustor. **Fuel**, v.195, p.226-231, 2017.

JURADO, Nelia; SIMMS, Nigel J; ANTHONY, Edward; OAKEY, John. Effect of Co-firing Coal and Biomass Blends on the Gaseous Environments and Ash Depositions During Pilot-scale Oxy-combustion Trials. **Fuel**, v.197, p. 145-158, 2017.

OKA, Simeon N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcel Dekker, 2004.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMA. **Resolução 016**, de 15 de abril de 2014. In: Legislação Ambiental. Disponível em: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/>> Acesso em 14. dez. 2016.

RIAZA, Juan; ÁLVAREZ, Lucia; GIL, Maria Victoria, PEVIDA, Covadonga PIS, Jose J; RUBIERA, Fernando. et al. Ignition and NO Emissions of Coal and Biomass Blends Under Different Oxy-fuel Atmospheres. **Energy Procedia**, v.37, p.1405-1412, 2013.

RNC. **Site da Rede Nacional de Combustão**. Criada Rede Nacional de Combustão. Disponível em: < <http://redenacionaldecombustao.org/content/criada-rede-nacional-de-combust%C3%A3o>>. Acesso em 8 de fevereiro de 2017.

TORREIRA, Raul P. **Geradores de Vapor**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1995.

TURNES, Stephen R. **Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

UNIFRAX I LLC. **Silplate Structural Insulating Board Catalogue**. Niagara Falls, NY, United States, 2015.

ZHANG, Dong; FAN, Panfeng; WU, Dongfang; LI, Yongdan. Pressure Drop Across a Fixed Bed Reactor With Mechanical Failure of Catalyst Pellets Described by Simplified Ergun's Equation. **China Particuology**, v. 3, p. 23-25, 2005.