

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ROGER ANDREY GIRARDI

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNALHA
DO TIPO GRELHA MÓVEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

ROGER ANDREY GIRARDI

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNALHA
DO TIPO GRELHA MÓVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Denilson José Marcolino de Aguiar

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNALHAS DO TIPO GRELHA MÓVEL

por

ROGER ANDREY GIRARDI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 10 de maio de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Denilson José Marcolino de Aguiar
Orientador

Prof. Dr. Oscar Regis Júnior
Membro Titular

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Creio que muitos ajudaram e estiveram junto ao longo desses anos, mas existem pessoas em especial que merecem uma atenção mais dedicada, creio que entre elas primeiramente são meus filhos, João Vitor e Maisa, por entenderem que sacrifiquei um tempinho meu sem estar ao lado deles, justamente porque esse trabalho é algo de bom para o futuro deles, a Camile e a Fernanda que me apoiaram de uma forma extraordinária. Agradeço a meus pais, Eroni Maria e Itacir Selvino, uma pelas ações e sabedoria e um pelo exemplo de engenheiro que é, a minha irmã Paula pelas sugestões, a Deus principalmente por dar-me a oportunidade de estar aqui basicamente.

Quanto aos níveis de aprendizado e conhecimento, meu orientador, professor doutor Denilson Aguiar por acreditar em mim e nos resultados que poderíamos alcançar, a todos os professores do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR de Ponta Grossa que expandiram minha mente e onde também fiz novos amigos. Aos demais professores, educadores, colaboradores que guiaram me por esse período de estudo.

Já pelo lado técnico, não poderiam faltar de agradecer ao meus colegas de trabalho Rodrigo Afonso Candeo, Matheus Argenton, Marcio Oliveira, Jean Santos, Jean Screpka, Rafael Ribas, Igor Weckerlin, Anderson Ramos, Gelson Soares que ajudaram de formas diretas e indiretas, com discussões, disponibilidade de tempo para argumentar e realizar alguns ensaios. Aos grandes do turno que suportaram e ajudaram muito, Rullian, Thiogo, Johnny, Paulo, Guilherme, Igor, Laercio, Cristiano, Paulo Stolle. Ao Marco Antonio Alves pela paciência, compreensão e os ensaios que fez.

E a tantos outros que serviram de inspiração e motivação para mim.

RESUMO

GIRARDI, Roger Andrey. **Caracterização de cinzas provenientes de fornalha do tipo grelha móvel**. 2017. 60 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O uso de queimadores de grelhas é importante para geração de energia como também para redução das emissões de carbono a atmosfera através da queima de biomassa devido essa fonte de energia ser renovável. Oriunda de diversas fontes orgânicas, sendo o foco de estudo proveniente da casca, cavaco, lascas e folhas da árvore de pinus (*Pinus Taeda*), o processo de combustão dentro da câmara ocorre em três etapas: secagem, ignição e combustão, gerando dois tipos de cinzas, a de fundo e as volantes, ambas são misturadas e descartadas, porém as cinzas volantes apresentam certas particularidades que poderiam ser reaproveitadas. Uma amostra da cinza volante foi coletada e separada em três partes para estudos e testes. Uma parcela foi destinada a ensaios preliminares baseado nos mesmos ensaios de areia verde, uma segunda parte enviada a ensaios para determinar o teor de argila e distribuição granulométrica e uma outra quantia levada para análise para difração de raio-x, todos os dados foram compilados e pode-se determinar o material inorgânico presente. A parcela de orgânicos é considerável mas de fácil separação. A parcela inorgânica das cinzas é formada basicamente por sílica alfa baixo quartzo, possui boa concentração nas peneiras de malha 50, 70 e 100, baixo teor de finos, boa distribuição granulométrica, podendo ser usada como material da areia base para fundição além das outras destinações que já são estudadas, a microfotografia realizada mostra que a sílica obtida pelas cinzas é ideal para aplicação em moldes.

Palavras-chave: Caracterização. Cinzas volantes. Reutilização. Sílica.

ABSTRACT

GIRARDI, Roger Andrey. **Characterization ashes from furnaces type reciprocating grate**. 2017. 60 pages. Completion course work (bachelor's degree in mechanical engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

The use of grate furnaces is important to energy generation also as to decrease carbon emissions to atmosphere through the burning of biomass, because this source of renewable energy. Deriving from various organic sources, being the case study coming from bark, chip, wood strands and tree leaves from pine (*Pinus Taeda*), the combustion process inside the chamber occurs in three steps, drying, ignition and combustion, generating two ashes types, bottom ashes and fly ashes, both are mixed and rejected, therefore fly ashes have some particularities that could be reused. A sample of fly ash was collected and separated in three portions for studies and tests. A portion was earmarked for preliminary trials, based on same trials for green sand, second part sent to tests to determinate clay content and granulometric distribution and another part sent to X-ray diffraction analysis, all data was compiled and the present inorganic material can be determined. The organic portion is large yet is easy to sort. The fly ash is formed by low quartz alpha silica, a good concentration in meshes #50, #70, #100, low fines, good granulometric distribution, it can be used as casting sand material in addition to other applications that have already been studied, microphotograph made show that silica from the fly ashes is ideal for applications in foundry as molds.

Keywords: .Characterization. Fly ashes. Reuse. Silica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Equação 1	32
Equação 2	34
Equação 3	35
Equação 4	36
Equação 5	36
Equação 6	37
Figura 1: Grelhas alternativas na parte inferior da fornalha	16
Figura 2: Ciclos de combustão gasoso e sólido	23
Figura 3: Esquema de difração de raio-x sobre estrutura cristalina	33
Figura 4: Ponto de coleta das cinzas	37
Figura 5: Peneiras 6 (A), 12 (B), 20 (C) e 30 (D).....	42
Figura 6: Peneiras 40 (A), 50 (B), 70 (C) e 100 (D).....	42
Figura 7: Peneira 140 (A), 200 (B), 270 (C) e Fundo (D)	43
Figura 8: Fundo limpo	43
Figura 9: Microfotografia das amostras	46
Gráfico 1 - % Distribuição de massas recém coletada	41
Gráfico 2 - % Acumulada de massas recém coletada.....	41
Gráfico 3 - % Distribuição de massas real	45
Gráfico 4 - % Acumulada de massas real	45
Gráfico 5 - Intensidade de picos.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Combustíveis e tipos de fornalha	14
Tabela 2 - Composição aproximada de algumas biomassas disponíveis	21
Tabela 3 - Peneiras e fator multiplicativo AFS.....	35
Tabela 4 - Classificação das areias e módulo de finura	35
Tabela 5 - Distribuição granulométrica recém coletada	40
Tabela 6 - Distribuição granulométrica após teor de argila	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE ABREVIATURAS

A.P.	Ar primário
NO _x	Gases óxidos a base de nitrogênio
PCS	Poder calorífico superior
NH ₃	Amônia
HCN	Cianeto de hidrogênio

LISTA DE SIGLAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	American Foundry Society
DIN	Deutsches Institut für Normung
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
ISO	International Standardization Organization
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 QUEIMADORES DE GRELHA	13
2.1.1 Montagem das Grelhas	15
2.1.2 Fornalhas de Biomassa/Bicombustíveis de Grelhas Alternativas	16
2.1.3 Processo de Combustão Dentro da Câmara	16
2.2 BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL	18
2.2.1 Composição da Biomassa	19
2.2.2 Processo de Combustão da Biomassa	22
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DE COMBUSTÃO	24
2.4.1 Sílica Biogênica	25
2.5 AREIAS PARA FUNDIÇÃO	26
2.5.1 Refratariedade	27
2.5.3 Forças de Tração	28
2.5.4 Permeabilidade	28
2.5.5 Dilatação	28
2.5.6 Índice de Finura	29
2.5.7 Teor de Argila	29
2.5.8 Formato dos grãos	30
3 JUSTIFICATIVA	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIO X	32
4.2 ENSAIOS DE AREIA A VERDE	33
4.2.1 Teor de Argila AFS	34
4.2.2 Distribuição Granulométrica e Índice de Finura	34
4.2.3 Teor de Finos e Teor de Concentração	35
4.2.4 Teor de Umidade	36
4.3 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE BIOMASSA E DE CINZA	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE BIOMASSA E DE CINZA	38
5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA CINZA	39
5.2.1 Quartejamento da Amostra	39
5.2.2 Teor de Umidade	39

5.2.3 Teor de Carbono	39
5.2.4 Distribuição Granulométrica Inicial	40
5.2.5 Teste do Teor de Argila	44
5.2.6 Módulo de Finura	44
5.2.7 Formato dos grãos	46
5.3 CARACTERIZAÇÃO DA FASE PRESENTE	47
6 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXO A - Análise de areia: Argila AFS	52
ANEXO B - Análise de areia: módulo de finura e distribuição granulométrica	54
ANEXO C - Ficha ICSD padrão 78-1252	57

1 INTRODUÇÃO

O uso de queimadores na indústria é bem difundido, especialmente onde o combustível é abundante ou o processo onde está instalado usa toda a matéria prima de forma sustentável, aproveitando tudo que possa ser explorado para geração de energia térmica. A biomassa usada como combustível, formada por cascas, lascas, folhas, pequenos galhos ou por pedaços quebrados de pinus, por sua vez gera resíduos na forma de cinzas, seja ela o fundo de caldeira ou do tipo volante, composta de uma parcela orgânica e outra inorgânica. A parte orgânica refere-se essencialmente por carbono não queimado, fuligem e mesmo minúsculas lascas de madeira quando a relação ar combustível está abaixo da ideal (rica em combustível). A parte inorgânica é formado por óxidos de metais alcalinos, alcalino terrosos, alumina, silicatos e outros compostos em quantia menor, que se não for separada corretamente, prejudica os demais processos e deteriora os maquinários seguintes pelo mecanismo de abrasão. As cinzas já vêm sendo estudadas para criação ou utilização em outros sub produtos proveniente da queima de biomassa, entre elas tijolos, asfaltos, vigas de concreto, carga em polímeros ou compósitos, na indústria eletrônica e até mesmo em painéis fotovoltaicos (FOLETTTO et al, 2005). Porém essa matéria prima abundante precisa ser classificada quanto a sua superfície, pureza e tamanho.

Uma nova utilização desse material, pode a princípio, ser usado na indústria de fundição desde que conhecidas suas propriedades físicas e sua constituição de base. Para isso uma análise dessas propriedades deve ser feita com o intuito não somente para possibilidade de fabricação de moldes para fundição, mas também como a redução de custos, já que este é descartado como lixo, sendo pago para ser retirado. Muito se fala no uso das cinzas de fundo de caldeira (a maior parcela gerada), mas as cinzas volantes, mais refinadas, passam a ser o foco de estudo.

Para que isso seja possível, deve haver uma grande contribuição da ciência dos materiais, conhecimento das areias de fundição e seu processo de fabricação, dos conhecimentos da química inorgânica, até mesmo da elaboração de cálculos estatísticos para determinar a média de fluxo de biomassa levada ao queimador, incluindo também os processos e mecanismos na geração de energia, a metrologia,

conhecimento dos elementos de máquina, interpretação dos dados vindo dos sistemas supervisórios e aplicação de controladores lógico programáveis.

A determinação do uso ou não desse material torna-se simples por ensaios de propriedades para fundição básicos e um ensaio mais detalhado e elaborado quanto a determinar a sua composição.

Um fato importante a saber é a sua origem, se a cinzas são provenientes de origem vegetal, se são carregadas com os resíduos de madeira (exemplo, se está aderido a casca do pinus) ou se formam-se pela degradação e erosão das paredes internas da câmara de combustão.

Quanto aos meios para caracterizar a cinza volante descartada, é importante saber do que é composta, quais materiais e fases presentes, quais métodos, equipamentos, laboratórios, necessidade de ensaios externos. Saber qual fase está presente é importante, pois existem variações de óxidos que mudam de fase e alteram o seu volume quando aquecidos a altas temperaturas, alteram as dimensões de peças que poderiam ser fabricadas na fundição.

Outro problema a se analisar é a quantia gerada em função de quanto combustível é levado a câmara de combustão, isso é importante para determinar se é viável a separação, condicionamento e refinamento do material sem que altere o processo de aquecimento de óleo e secagem da madeira.

Sabendo se predominam óxidos de silício, a comparação da cinza com as mesmas propriedades da areia base para fundição, poderia tornar esse material uma fonte alternativa para a fundição?

O objetivo geral desse trabalho é avaliar as características e propriedades dos resíduos de combustão de um queimador de grelhas móveis de uma empresa madeireira situada na região dos Campos Gerais, no distrito industrial de Ponta Grossa – PR.

Para que seja atingido, há alguns objetivos mais específicos que devem ser executados, como:

1. Determinar o volume gerado de cinzas por unidade de tempo em relação as diversas propriedades do processo, como alimentação de biomassa, pressão da câmara e as temperaturas da câmara de combustão;
2. Avaliar as fases presentes na cinza descartada, presença de metais alcalinos, quais os óxidos presentes e até mesmo se há presença de metais pesados para destinar de forma certa o seu descarte;

3. Avaliar as suas características propriedades físicas comparado a areias base para fundição, com a possibilidade de utilização como nova fonte de matéria prima.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 QUEIMADORES DE GRELHA

Os queimadores de grelha evoluíram a mais de um século e meio, desde os princípios da indústria até o uso em pequenas plantas, para gerar energia térmica por diversas décadas, porém estão ficando de lado nas últimas duas décadas devido:

- A baixa disponibilidade de carvão de boa qualidade;
- Requerimentos contra poluição mais restritos;
- Alta demanda de vapor requer grandes plantas;
- Ascensão de câmaras de leito fluidizado com melhores características (RAYAPROLU, 2009).

Queimadores de grelhas tornar-se-ão obsoletos, pois muitos modelos surgiram e desapareceram ao longo dos tempos, mas apenas três tipos ainda existem e funcionam relativamente bem:

- Queimadores de biomassa;
- Queimadores distribuídos;
- Queimadores a gás e/ou óleo.

Os queimadores de grelha foram os primeiros sistemas a utilizarem combustíveis sólidos, sendo hoje os que mais se aplicam à queima de biomassa, sua capacidade de geração de energia é bem ampla e emissão alta de voláteis e baixos teores de cinza (dependendo da biomassa utilizada) (YIN et al, 2008 e JUNG et al, 2004).

Quanto ao tipo de alimentação podem ser: alimentadas por cima da grelha ou por baixo da grelha. As alimentadas por baixo da grelha têm o combustível e ar da parte inferior e a descarga de cinzas pelas laterais. Suas capacidades são pequenas e estão desaparecendo da indústria, isso porque são restritas e exigem combustíveis refinados e de alta qualidade. (RAYAPROLU, 2009).

Nos modelos onde a alimentação é pela parte superior, há outra divisão em 4 tipos de grelhas:

- Grelhas estacionárias anguladas: a grelha fica parada, a biomassa se move por escorregamento, influenciado pela gravidade, sendo o ângulo da grelha

importante, isso faz com que seja difícil o controle da queima e risco de desmoronamento do combustível;

- Grelhas de corrente: o combustível é alimentado num lado, levado a ponto de combustão e as cinzas descartado no retorno das correntes, melhora no controle e boa eficiência em termos de carbono não queimado;
- Grelhas alternativas: o combustível é levado ao ponto de combustão pelo movimento de vai e vem das grelhas móveis ligadas por barras entre as grelhas fixas. Os resíduos finais são levados ao final da grelha;
- Grelhas vibrantes: tem um movimento de vibração que distribui o combustível uniformemente, possui menos partes móveis que as outras grelhas móveis, implicando assim na sua manutenção e maior confiabilidade (YIN et al, 2008)

Para os queimadores de biomassa, um distribuidor muitas vezes tornar-se necessário, devido a quantia de partículas finas presentes (até 30% da massa do combustível), isso para evitar a segregação, justo porque as grelhas são projetadas para materiais maiores. As partículas mais finas queimam em suspensão e são carregadas pelo fluxo de ar, já as partículas e materiais mais grossos, queimam sobre a grelha (STULTZ, 1992).

A tabela 1 mostra a compatibilidade de combustíveis e tipos de fornalhas existentes.

Tabela 1: Combustíveis e tipos de fornalha

Combustível	Queimadores de grelha		Queimadores distribuídos	
	Correntes	Alternativas	Correntes	Portão de descarga
Carvão	Cinzas até 25%	Cinzas até 15% Grandes	Alto teor cinzas Grandes	Cinzas até 15% Pequenas e
Bagaço	Não	partículas até 200 ton/h	partículas até 250 ton/h	médias partículas até 100 ton/h
Biomassa	Não	Até 52% umidade	Até 50% umidade	Até 50% umidade
Coque	Com carvão em camadas	Não	Não	Não
Combustíveis Abrasivos	Com carvão em camadas	Não	Não	Não
Alta umidade	Em arcos e ar quente	Em arcos e ar quente	Fogo em suspensão e ar quente	Fogo em suspensão e ar quente
Aglomerante	Dilatação menor que 5%	Não	Sem restrição	Sem restrição

Fonte: Rayaprolu (2009)

A partir de 1980 os queimadores de fornalhas vieram a decair o seu uso devido a quatro fatores:

- Redução da qualidade do carvão mineral disponível, onde as fornalhas são extremamente restritas quanto a tamanho, finos e cinzas e incapazes de operar com alto teor de enxofre;
- As normas contra poluição implicando na sua eficiência de operação;
- Maior tecnologia nas câmaras de leito fluidizado onde são mais versáteis e mais ecológicos;
- Altas demandas de energia e/ou vapor.

Entretanto mantém-se ainda no mercado substituindo o carvão com misturas de biocombustíveis, bagaço de plantas em regiões de climas tropicais, biomassa nas regiões temperadas e queima de resíduos de lixo municipais (RAYAPROLU, 2009).

Biocombustíveis possuem baixo ou praticamente nulo teor de enxofre e a umidade decresce com o aumento da temperatura, ao mesmo tempo câmaras de leito fluidizado não apresentam melhores eficiências com tais combustíveis, assim fornalhas de grelhas são alternativas para a queima de biocombustíveis quando abundantes, carvão mineral é somente usado nos casos de forma auxiliar ou quando há sazonalidade ou baixa disponibilidade de biocombustíveis (RAYAPROLU, 2009).

2.1.1 Montagem das Grelhas

A grelha é o ponto mais baixo da câmara de combustão e tem duas funções principais, distribuir o combustível pelo transporte e inserir ar primário pelos intervalos de deslocamento do combustível e da grelha. As grelhas podem ser refrigeradas a ar ou refrigeradas a água, este último modelo precisa de pouco ar primário para tal função, dedicando mais ao uso do ar para o sistema secundário.

Entre as grelhas móveis, as vibrantes são as que possuem maior vida útil e grande confiabilidade, possuem um sistema contínuo de descarga de cinzas, onde a grelha vibra em altas frequências porém em baixas amplitudes, há uma correlação entre o tempo para alimentar a grelha com sólidos e para descarregar as cinzas no final que interferem na vibração da grelha. Todas as suas partes móveis e mecanismos de atuação geralmente ficam isolados do calor e das chamas, aumentando a vida útil e facilitando a manutenção (MADSEN, 2012).

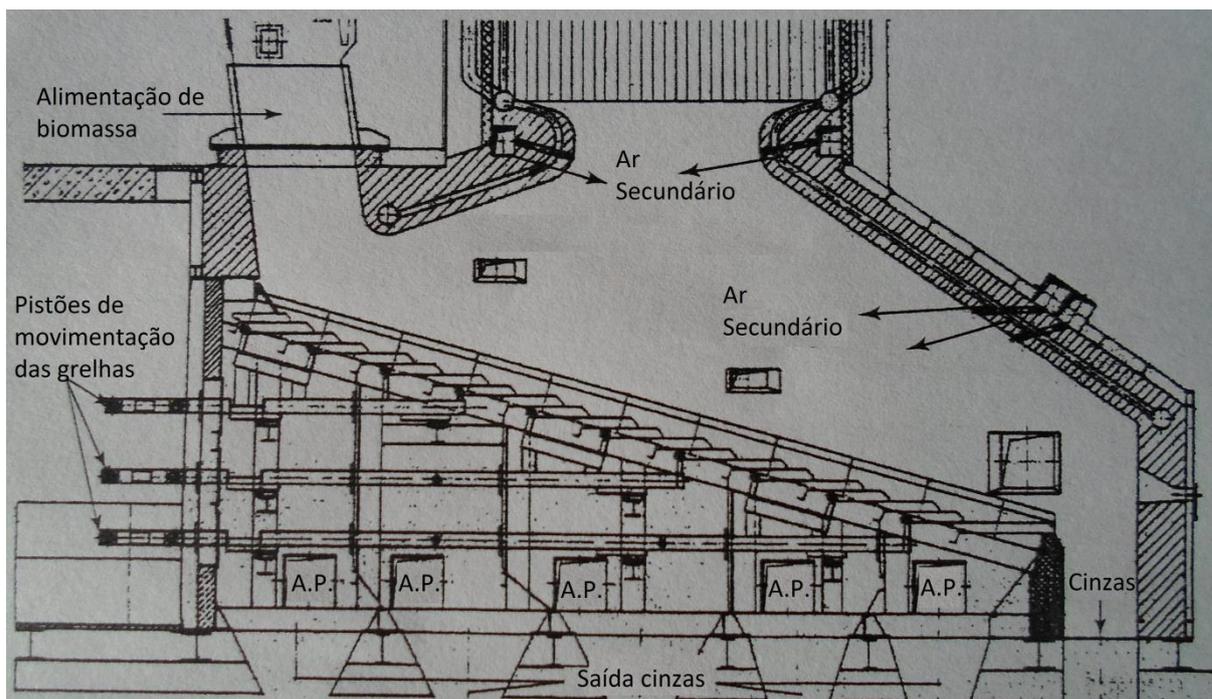
2.1.2 Fornalhas de Biomassa/Bicombustíveis de Grelhas Alternativas

A alimentação de combustível é feita para frente, através de movimento para frente e para trás de grelhas alternativas em relação às grelhas fixas, quando há esse movimento, abrem-se intervalos que alimentam com ar, vindo a queimar mais eficiente o material na camada inferior.

Esse tipo de fornalha é indicado para combustíveis aglomerados e com altos teores de umidade, sem tamanho definido e médio poder calorífico, a alimentação de combustível nesse tipo de fornalha é mais simples e fácil de realizar (RAYAPROLU, 2009).

A figura 1 mostra um exemplo de fornalha com grelhas alternativas.

Figura 1: Grelhas alternativas na parte inferior da fornalha



Fonte: Rayaprolu (2009)

2.1.3 Processo de Combustão Dentro da Câmara

A forma de alimentação até as grelhas é por gravidade, apresentando 3 zonas distintas: secagem, ignição e combustão. Os arcos frontais e traseiros têm papel importante especialmente a altos teores de umidade, pois:

- Formam uma estricção (gargalo) que segura os gases acima da grelha;

- Defletem os gases quentes de trás para o combustível (arco traseiro);
- Radiam o calor da fornalha para secar e devolatilizar o combustível (arco frontal);

Saídas de ar secundárias estão estrategicamente colocadas após a estricção acima da fornalha para queima dos voláteis (RAYAPROLU, 2009).

Para grelhas queimando biomassa, o excesso de ar é normalmente ajustado para acima de 25%. A razão de ar primário e secundário tende a ser 40/60, nas fornalhas mais modernas. O contrário ocorre nas mais antigas, relação 80% primário e 20% secundário.

A alimentação nesse tipo de fornalha é considerada como fluxo cruzado onde a biomassa é alimentada por uma camada grossa perpendicular ao fluxo de ar primário. O fundo da biomassa é aquecido pelo ar pré-aquecido, enquanto a parte superior é pela radiação da fornalha. Todo o combustível é disposto uniformemente sobre a grelha que possui características porosas, o colchão de combustível é aquecido pela radiação das chamas acima e dos refratários das paredes até iniciar a ignição pelo topo (YIN et al, 2008).

Depois da ignição, a reação propaga-se da superfície para baixo sentido grelha contra a direção do ar primário. O calor gerado é transportado contra o fluxo de ar de combustão que seca e retira os voláteis da biomassa úmida. Isso permite que a reação continue a se propagar, por essa direção oposta de fluxo de calor e fluxo de ar, o calor não desce, ficando longe da posição de onde foi gerado. O calor então presente na reação frontal, é originado pela oxidação do combustível e se nem todo ar for consumido na reação de combustão, uma camada de carvão rico em carbono é formada (YIN et al, 2008).

A umidade, poder calorífico, tamanho das partículas e condições de operação, como fluxo de ar primário, tem grande influência no comportamento da combustão sobre a grelha. Dependendo da quantia de ar primário adicionada a fornalha, três modos de combustão podem ser observados:

- Combustão de oxigênio limitado sob baixa taxa de ar;
- Combustão de reação limitada quando aumentada a taxa de ar;
- Extinção por convecção se aumentada ainda mais a taxa de ar. (SHIN e CHOI, 2000)

As grelhas têm um ângulo de queda que varia 0 a 15°, dependendo do tipo de mecanismo para movimentação interna e do próprio combustível, diferente das grelhas contínuas, onde o colchão de combustível é constantemente movimentado sobre uma corrente transportadora (RAYAPROLU, 2009).

2.2 BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL

Os problemas como a limitação de uso dos combustíveis fósseis, o aquecimento global e emissões de gás carbônico na atmosfera, alavancam as pesquisas para uso de fontes alternativas e renováveis para a produção de energia, dentre elas, a solar, a eólica, uso das marés e também do uso da biomassa.

Os queimadores de grelha são uma das tecnologias já existentes que podem se converter combustíveis fósseis para o uso da biomassa, justamente porque são capazes de operar com uma grande variedade de materiais com diversos teores de umidade. A queima da biomassa tem sido estudada ao longo dos anos e ainda tem se gerado mais dúvidas para novas pesquisas como a conversão da biomassa em combustível na grelha, controle de corrosão e formação de depósitos, formação e controle de poluentes. Porém esses equipamentos são conhecidos também como formadores de alto teor de carbono nas cinzas, baixa eficiência, emissores de monóxido de carbono além das altas taxas de depósitos e corrosão (GÖERNER, 2001, SUBRAMANIAN et al, 2010 e YIN et al, 2008).

Os empenhos e estudos feitos nos processos dos queimadores a grelha são listados:

- Emissões de poluentes: geralmente por causa da combustão incompleta na grelha, aumentam a taxa de emissão de monóxido de carbono, alguns hidrocarbonetos, alcatrão e carbono não queimado. A presença de elementos específicos nos combustíveis pode agravar na emissão de ácido clorídrico, óxidos de enxofre, compostos a base de cloro e metais pesados. Sendo o maior emissor, os compostos a base de nitrogênio (NH_3 , HCN e NO_x).
- Formação de depósitos e corrosão: geralmente por combustíveis que apresentam cloro a sua mistura (exemplo palha), os depósitos formados impedem a transferência de calor nos equipamentos e a corrosão afeta na vida

- útil. Importante lembrar que não dependem somente dos combustíveis, formação de depósitos e corrosão são associados as condições de combustão.
- Uso de computação e modelagem para simulação: representa a maioria dos estudos feitos, separada em duas partes, modelagem da conversão da biomassa em combustível e mistura, combustão, formação de depósito e poluentes no leito de queima. O fluxo de gases e das chamas, influem na emissão de compostos a base nitrogênio, na transferência de calor e estabilidade da combustão.
 - Outros trabalhos experimentais: também importantes não só na combustão, mas na geração de dados e informações para a modelagem computacional e validação dos testes, que trabalham em parceria com os itens acima citados (YIN et al, 2008).

2.2.1 Composição da Biomassa

A biomassa tem origem de plantas que contém umidade absorvida ou condensada com material inorgânico (seja por composição ou por contaminante) e materiais orgânicos. Variam quanto ao estado, à espécie da planta, partes da planta e tempo de vida (SHAFIZADEH, 1981).

De forma geral, qualquer material orgânico não fóssil pode ser considerado biomassa. Para os queimadores, dois tipos são os mais relevantes: produtos descartados e culturas energéticas. Como os descartados, tem-se: a base de madeira (casca, lascas, gravetos, serragem, cavacos), resíduos de culturas (casca de arroz, trigo, milho) e base de resíduos municipais orgânicos (estrume, chorume). Para as culturas energéticas são comumente usados algumas gramíneas e árvores de madeira dura, essas possuem uma alta taxa de crescimento que podem ser usadas como fontes regulares de combustíveis (SAMI et al, 2003 e EASTERLY et al, 1996).

As células vegetais diferem das células animais pela presença de celulose nas suas paredes e grandes vacúolos (organelas que servem para regular a troca de água pela osmose e armazenar sais minerais e proteínas). Tecidos das madeiras contém células vivas, mas são compostas mais por células mortas que consiste nas paredes celulares e material intercelular (SHAFIZADEH, 1981).

As cavidades das células mortas têm água que se perde quando sofre secagem, também há água absorvida nas paredes celulares que se equilibra com a umidade relativa do ar, a variação do teor de umidade da madeira varia conforme condição ambiental, *in natura*, apresentam na faixa de 50%, secando em meio gasoso podem baixar a 20%. A umidade não somente atua como sumidouro de calor, como também abaixa a eficiência da combustão (SHAFIZADEH, 1981).

Toda biomassa é composta basicamente por três componentes: lignina, hemiceluloses e celulose, além de outros menores como: açúcares, lipídios, proteínas, água, sílicas e amidos). A fração de cada constituinte depende de cada tipo de biomassa, variando de espécie, tempo de crescimento, condições de plantio e tipo de planta. Biomassa geralmente contém carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cloro, além de elementos formadores de cinza (alumínio, cálcio, ferro, potássio, manganês, sódio, fósforo, silício e titânio) e outros elementos em menor escala como bário, cádmio, cobalto, cromo, cobre, mercúrio, molibdênio, nióbio, chumbo, tântalo, vanádio e zinco) (SAMI et al, 2003, e DEMIRBAS, 2004).

A composição mineral varia de acordo com a espécie, localidade e contaminação do solo. Madeira contém 0,5% de cinzas compostas basicamente de metais alcalinos e alcalinos terrosos (como carbonatos e sais) e cristais de sílica. A sílica é especialmente abundante nas palhas de cereais com teores próximos a 18% ou mais. A casca contém mais cinzas que a madeira. A sílica e outros minerais atuam também como drenos de calor, mas em compostos de solução iônica podem ter um efeito catalítico na gaseificação e combustão da biomassa (SHAFIZADEH, 1981).

Microfibrilas de celulose incorporada a matriz de lignina e hemiceluloses formando as paredes celulares e os principais componentes da biomassa. Também existem lipídios, terpenos solúveis em éter, compostos fenólicos, carboidratos e proteínas solúveis em benzeno, álcool e água. Os componentes solúveis são chamados de extrativos. As folhas e cascas têm mais extrativos e menos paredes celulares que a madeira e suas fibras (SHAFIZADEH, 1981).

A biomassa é uma fonte importante de energia, representa 14% da demanda mundial, segue atrás apenas do óleo, carvão mineral e gás natural. Em países em desenvolvimento, o seu uso pode representar até 35% da matriz energética. É considerada ambientalmente amiga, não há aumento do dióxido de carbono na combustão, não há a emissão de metano (considerado 21 vezes mais maléfico que o

CO₂, baseado em massa no período de 100 anos), a maioria das biomassas não tem ou possuem baixíssimo teor de enxofre, combustíveis a base de madeira e papel possuem menos nitrogênio na sua composição se comparado ao carvão (SAMI et al, 2003, GLABORG et al, 2003 e DEMIRBAS, 2004).

Generalizando:

- o carbono presente nas madeiras é maior que os das gramíneas e herbáceas;
- madeiras de coníferas e papel tem a menor taxa de nitrogênio constituinte, diferente das gramíneas e herbáceas;
- o cloro presente é menor na madeira que nas gramas, grãos e resíduos de frutas;
- palha, cereais, gramas e grãos tem baixo teor de cálcio e altos teores de potássio e sílica na cinzas (SAMI et al, 2003, e DEMIRBAS, 2004).

Comparado aos combustíveis fósseis, a biomassa:

- contém maior teor de voláteis, menos carbono e mais oxigênio, além de poder calorífico menor;
- têm a pirólise iniciada em temperaturas menores;
- têm fração do calor gerado pelos voláteis maior que no carvão;
- a base de palha, tem mais alcalinos livres nas cinzas que aumentam a fuligem e escória;
- possui carbonos de pós combustão com maior reatividade de oxidação, devido aos metais alcalinos presentes que os carbonos de pós combustão usado por carvão mineral (BASI et al, 1999).

A tabela 2 mostra os valores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, extrativos, lignina, cinzas e poder calorífico superior de algumas biomassas.

Tabela 2: Composição aproximada de algumas biomassas disponíveis

(continua)

Biomassa	% C	% H	% O	% N	% S	% Extrativos	% Lignina	% Cinzas	PCS kcal/kg
Eucalipto	48,2	6,36	45,04	0,07	0,084	3,07	25,65	0,25	4572,2
Pinus	49,0	6,65	43,67	0,09	0,114	2,61	28,75	0,39	4864,2
Bagaço cana	50,0	6,26	42,34	0,27	0,122	16,59	26,71	0,93,	4511,8

Tabela 2: Composição aproximada de algumas biomassas disponíveis

(conclusão)

Biomassa	% C	% H	% O	% N	% S	% Extrativos	% Lignina	% Cinzas	PCS kcal/kg
Cedro	46,8	6,34	45,44	0,36	0,134	12,94	25,9	1,01	4756,2
Palha milho	45,2	6,43	39,32	1,99	0,228	17,50	22,85	6,83	4515,4
Arroz	36,0	5,12	41,56	0,61	0,194	4,08	28,94	16,78	3863,8

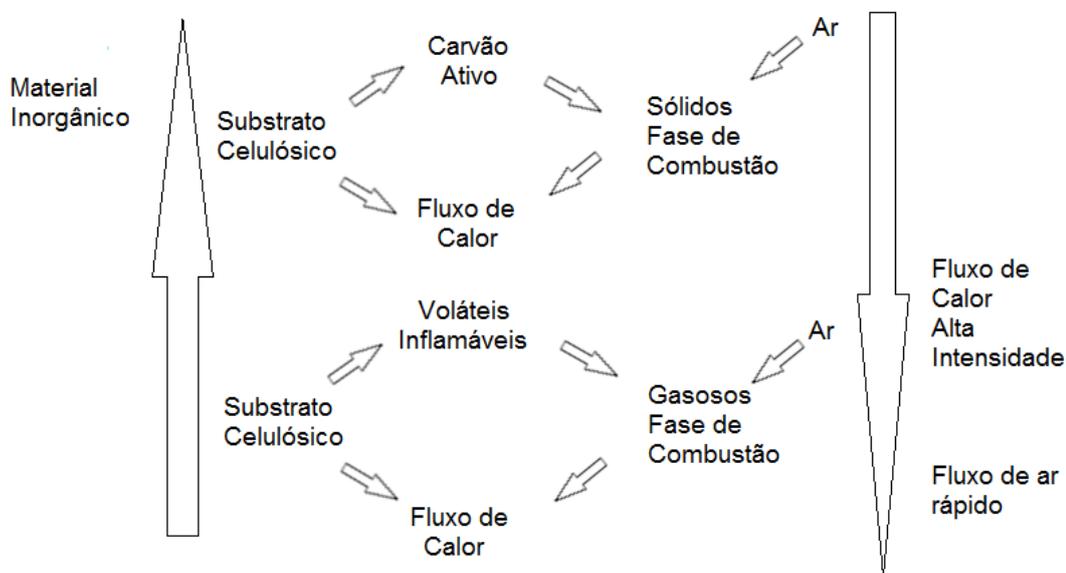
Fonte: Protásio et al (2012)

Além das propriedades físico-químicas da biomassa, outros fatores são relevantes, como a sazonalidade das culturas para abastecer as usinas de forma contínua ao longo do ano, se há a necessidade de beneficiamento da biomassa antes de ser queimada, como moagem, secagem e peletização, os estoques serem próximos as unidades geradoras para não incrementar no valor final devido aos custos de transporte e se as culturas destinadas a produção de biomassa, não irão competir contra as culturas de alimentos, em especial nos países em desenvolvimento (US EPA, 2007)

2.2.2 Processo de Combustão da Biomassa

A combustão da biomassa ocorre em duas etapas, na primeira, há uma fase gasosa em altas temperaturas onde a pirólise e a decomposição térmica da biomassa transforma-se em uma mistura de gases combustíveis, junto com o ar e o calor das chamas que rapidamente se espalham. A segunda etapa, à baixa temperatura, a pirólise ocorre principalmente com carvão transformado em mistura gasosa de água e dióxido de carbono, que não é muito inflamável. A oxidação do carvão ativado agora gera incandescência e combustão latente, ocorrendo em taxas mais baixas (SHAFIZADEH, 1981).

Figura 2: Ciclos de combustão gasoso e sólido



Fonte: adaptado de Shafizadeh (1981)

Como mostrado na figura 2, aumentando a taxa de calor, aumenta o fluxo gerado pela combustão dos voláteis, fornecendo energia para gaseificação do substrato e propagação do fogo intenso. Quando a temperatura ou o fluxo de calor decresce abaixo dos níveis estequiométricos, a oxidação do carvão resulta na combustão latente, combustão incompleta na fase sólida junto de fumaça ou da emissão dos produtos não oxidados na pirólise. Observa-se tal fenômeno com fibras de baixa densidade ou materiais porosos. Nesses materiais o carvão é lentamente oxidado pela falta de ar e a baixa taxa de calor liberado por condução, convecção e radiação, requerido para mais carbonização e propagação da combustão latente. É observado isso no estágio transitório do acendimento ou quando se apaga o fogo na fornalha (SHAFIZADEH, 1981).

De forma geral a taxa de queima é função da transferência de calor e de massa tão como da composição e tamanho da partícula da biomassa. Combustíveis com o menor tamanho tem área superficial maior, expostas ao calor e radiação sendo rapidamente secas, pirolizadas e queimadas. Diferente das partículas maiores, como toras, que queimam lentamente devido a limitação das taxas de transferência de calor e massa (SHAFIZADEH, 1981).

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DE COMBUSTÃO

As cinzas de combustão são compostas basicamente por uma parcela inorgânica e uma menor parte por materiais orgânicos (carbono não queimado). As proporções desses elementos dependem do tipo de biomassa, da carga, das condições de operação e combustão do processo (GIRÓN et al, 2013).

A parcela orgânica pode ser usada como matéria prima para obtenção de carvão ativado, em diversos estudos o material inorgânico pode ser destinado como nutrientes para o solo (depende de uma prévia análise elementar quanto a metais pesados), além da fabricação de concreto (GIRÓN et al, 2013).

Segundo Girón et al (2013), para o eucalipto, a quantidade de carbono não queimado proveniente de fornalhas de grelhas são geralmente porosos, mantém-se a estrutura original das paredes celulares e das fibras da casca da árvore.

Os compostos químicos a altas temperaturas são baseados em óxidos, os quais predominam de cálcio e de silício, sendo suas distribuições granulométricas bem dispersas uma da outra, os óxidos de cálcio, na forma de calcita, são mais finos, enquanto os óxidos de silício ficam retidos nas peneiras mais grossas na forma de material vítreo, quartzo e silicatos. Outros óxidos também estão presentes, mas em porcentagens muito baixas (GIRÓN et al, 2013).

Metais pesados presentes nos resíduos de combustão, como níquel, cromo, mercúrio, devem-se as características do solo onde a madeira foi plantada e do tipo de combustível usado, como o caroço de azeitona (JAMES et al, 2012).

2.4 A SÍLICA

Conhecido por dióxido de silício, sendo o composto químico mais abundante na crosta terrestre, possui densidade variando entre 2000 e 3000 kg/m³, com alta resistência térmica e ponto de fusão em 1700 °C, a unidade estrutural da sílica e silicatos é o tetraedro (SiO₄), átomo de silício ao centro que arranja a outros 4 átomos de oxigênio. Arranjos diferentes formam estruturas conhecidas, como o quartzo, tridimita e cristobalita. Os depósitos de sílica são encontrados em todas as partes do globo e foram formados ao longo de todas as eras geológicas, a mineração da sílica ocorre em locais ricos em quartzo, quartzitos e arenitos, onde se obtém a areia de

sílica, esta por sua vez é base da matéria prima de diversos ramos da indústria eletrônica, cosmética, farmacêutica, cerâmica, metal-mecânica (CHAVES, 2008).

Podem ser de origem mineral ou biogênica (natural ou sintética), classificadas como cristalinas e amorfas:

- Sílicas cristalinas naturais: quartzo, cristobalita, tridimita, coesita;
- Sílicas cristalinas sintéticas: keatita, sílica W, porolis;
- Sílicas amorfas naturais: opala, sílica biogênica, terras diatomáceas, vítreas;
- Sílicas amorfas sintéticas: sílica fundida, pirogênica, precipitadas, coloidal, gel;

O quartzo é a forma termodinamicamente mais estável da sílica cristalina e ocorre principalmente como alfa-quartzo, isso para um estado de baixa temperatura, sendo o Beta para altas temperaturas (BON e SANTOS, 2016).

2.4.1 Sílica Biogênica

Compreende toda aquela gerada por organismos vivos, como plantas ou animais (exoesqueletos), geralmente na estrutura tipo gel, acredita-se que ocorre na forma biogênica, por reações moleculares da sílica solúvel até a forma sólida, pelo processo de absorção e acumulação do monômero de ácido silícico, na polimerização de monômeros até o crescimento de núcleos estáveis e esféricos de tamanho crítico. (ILER, 1979).

Esse processo pode ser modificado pela presença de aditivos, sendo que o ser vivo pode usar desses aditivos para uma obtenção favorável da cadeia de sílica, formam-se principalmente nas proteínas nos seres mais simples e nas ligninas nas plantas maiores (POULSEN et al, 2000 e PATWARDHAN, 2002).

Sendo que nas plantas maiores, tem a função de aumento de resistência mecânica estrutural, aumento a resistência contra fungos e melhoria do processo de fotossíntese, geralmente em plantas cultivadas em climas tropicais, onde o calor e umidades altas favorecem o ataque desses organismos, tem se o acúmulo caracterizado nas regiões de caules, cascas e folhas (FAUTEUX, 2005).

2.5 AREIAS PARA FUNDIÇÃO

De longe a fundição por areia é um dos métodos mais versáteis para formar peças com grande variedade de formas e matérias primas utilizadas com uma grande gama de metais e ligas que variam desde peças em termos de gramas até escala de toneladas (AMMEN, 1979).

A fundição basicamente envolve o vazamento de metais líquidos em moldes resistentes superiores as temperaturas de fusão do metal. Moldes metálicos não são aconselháveis devido as variações térmicas aplicadas, o desgaste corrosivo, presente nos metais ferrosos (FERREIRA, 2010).

Sendo a produção de aço e suas ligas treze vezes maior que a soma dos metais não-ferrosos (ABIFA, 2006), torna-se importante a fundição em moldes que resistam as altas temperaturas, formadas por areias, aglomerantes, aditivos e certa quantia de umidade, denominada de moldagem em areia verde (FERREIRA, 2010).

Para que se obtenha o êxito nas fundições, as areias devem apresentar as seguintes propriedades:

- Estabilidade térmica e dimensional;
- Distribuição de forma e tamanho;
- Não ser reativo e não apresentar molhabilidade ao metal fundido;
- Ausente de substâncias de partículas abaixo do ponto de fusão do metal;
- Ausente de gases a altas temperaturas;
- Estar disponível a baixo custo;
- Composição uniforme;
- Compatível com aditivos e aglomerantes.

O tipo de areia e granulometria afetam as propriedades como refratariedade, permeabilidade e dilatação térmica, já a resistência mecânica é influenciada pela quantia de aglomerante. O acabamento superficial está relacionado ao tamanho do grão, quanto menor o diâmetro do grão, melhor o acabamento superficial, porém influencia na permeabilidade, dificultando a passagem dos gases e exigindo quantidades maiores de aglomerantes devido ao aumento da superfície específica (FERREIRA, 2010).

O grau de pureza também é fundamental, pois influencia na refratariedade e para a adição de certos materiais aglomerantes. Sais de sódio e potássio, junto com óxido de ferro causam a queima da areia junto ao metal fundido.

Ferreira (2010) cita a importância dos valores de pH na areia:

A presença de materiais com pH alcalino na areia poderá neutralizar a catálise ácida utilizada nos processos de aglomeração a frio com resina auto-secante e uma areia com pH ácido poderá afetar o aumento da resistência mecânica (presa) nos processos de aglomeração com Silicato de Sódio/CO₂. (FERREIRA, 2010).

A argila está muitas vezes misturada naturalmente a areia, quando seus valores são maiores que 5%, basta adicionar umidade para obter areia verde, essa é chamada de areia natural argilosa, já quando inferior a 5%, chamam-se areias siliciosas. Muitas areias a verde são formadas de areias siliciosas com teores controlados de aglomerantes selecionados para moldes de fundição (FERREIRA, 2010).

A seguir são listadas as propriedades comumente requeridas para areias:

2.5.1 Refratariedade

É a habilidade da areia lidar com altas temperaturas sem fundirem ou amolecerem. Sabendo disso, é importante uma areia verde ter maior refratariedade para metais ferrosos do que para alumínio ou cobre e suas ligas, também devem ter maior refratariedade para volumes maiores de produção do que menores volumes do mesmo metal líquido (AMMEN, 1979).

Quanto mais pura a areia, maior o índice de refratariedade, havendo redução

2.5.2 Resistência Mecânica

É a força da areia temperada expressa pela capacidade de manter o molde em forma. É o teste mais usado nas areias em fundições, moldes de areia são sujeitos a forças de tração, compressão, forças normais e de cisalhamento (AMMEN, 1979).

Areia naturalmente não possui uma estrutura aglomerante, em geral é adicionada uma substância para que aumente a força de adesão entre os grãos de areia. Dependendo da granulometria da areia, quanto maior os grãos, menor a superfície específica e menor a quantidade de aglomerante para os grãos se ligarem. Quando os grãos são menores, maior a superfície específica e mais aglomerante deve

ser adicionado, pois aumentam a quantidade de pontos de contato. Agora quando há uma distribuição dos grãos de forma que os pequenos ocupem os espaços entre os grãos grandes, a resistência mecânica é aumentada para mesma quantidade de aglomerante que somente usado para grãos grandes (FERREIRA, 2010).

Grãos redondos tem uma uniformidade do aglomerante e pontos de contato regular enquanto nos grãos angulosos ocorre o contrário reduzindo a resistência mecânica, para sanar isso é preciso compactar os moldes a fim de maximizar a densidade e aumentar a resistência pelo maior número de pontos de contato (FERREIRA, 2010).

2.5.3 Forças de Tração

É a força que segura a areia na face, ou melhor, explicada como aquela aplicada perpendicularmente ao corpo de prova que possivelmente provoque a sua ruptura. Areias verdes têm maiores valores de compressão do que tração, porém as falhas em moldes mais usuais são suscetíveis a ocorrer sob falhas de tração (AMMEN, 1979).

2.5.4 Permeabilidade

Capacidade que a areia aglomerada apresenta de ser permeável, deixar fluir gases pelos espaços intersticiais. Quando líquido é vazado ao molde, o ar presente tende a escoar pelos espaços vazios, substituindo pelo metal líquido tomando a forma do recipiente. Se esse ar não escoar, podem haver falhas na superfície da peça causados por bolhas que ficam retidas. Areias de grãos grossos permitem maior escoamento de ar, grande permeabilidade, o oposto ocorre com areias de granulação mais fina, o ar é dificultado a escoar pela área menor intersticial, porém o acabamento superficial é mais refinado (FERREIRA, 2010).

2.5.5 Dilatação

A maioria dos metais expandem quando aquecidos e diminuem suas dimensões ao resfriarem, a sílica em geral, não foge a regra, porém apresentam diversas mudanças quando aquecidas e resfriadas.

Na temperatura ambiente apresenta cristais na forma tipo α , linearmente se expande a 573 °C quando sofre uma alteração alotrópica de quartzo α para quartzo β , junto com uma expansão volumétrica grande. Essa expansão é a grande causadora de diversos defeitos dimensionais em peças de fundição.

Outros materiais como a zircônia, a olivina e chamote possuem coeficientes de dilatação menores que a sílica. A zircônia não se combina facilmente com óxidos de ferro sendo indicadas a moldes para ferros fundidos, aços e suas ligas, *shell molding* e de cera perdida.

Areias de olivina são compostas por silicatos de magnésio (Mg_2SiO_4) com faialite (Fe_2SiO_4), a presença de ferro aumenta a refratariedade do molde, dura menos que a sílica e possui grãos de formas angulares. O chamote é constituído por agregados produzidos a partir de tijolos refratários ou cadinhos em argila depois da queima, devido seu baixo coeficiente de dilatação, evita defeitos dimensionais nas peças fundidas (FERREIRA, 2010).

2.5.6 Índice de Finura

Esta é a medida do tamanho de grão na areia, é determinada pela passagem de uma amostra padrão através de uma série de peneiras graduadas e normatizadas (AMMEN, 1979). Essa amostra é agitada por um período de 15 minutos aproximadamente, o índice de finura também define a superfície específica da areia, quanto maior o índice de finura, maior será sua superfície (FERREIRA, 2010).

2.5.7 Teor de Argila

É definida como as partículas existentes na areia, quando dispersas em meio aquoso à temperatura ambiente, decantam com uma velocidade inferior a 25,4 mm/min para areias de sílica, inferior a 35,5 mm/min para areias de olivina e inferior a 53,6 mm/min para areia de cromita ou zirconita, incluindo desde finos inorgânicos até partículas de areia de diâmetro inferior a 0,02 mm.

Feito através da sedimentação por via úmida e retirada das partículas de argila em suspensão (FERREIRA, 2010).

2.5.8 Formato dos grãos

Classificam-se em quatros formatos básicos: arredondados, semi arredondados, angulares e agrupados.

Os arredondados e semi arredondados apresentam um menor contato entre si, porem a permeabilidade não se altera com a compactação excessiva no processo de fabricação do molde, porém apresentam uma menor resistência por causa da falta de entrelaçamento entre os grãos, além de oferecerem ao molde uma grande expansão quando aquecidos (OLIVEIRA, 2013).

Os grãos angulares possuem uma maior área de contato e por consequência um forte entrelaçamento e maior resistência mecânica, sendo assim sua aplicação é mais destinada a fabricação e machos (OLIVEIRA, 2013).

Já os grãos agrupados apresentam entre si um cimento ligante de baixa resistência que se rompem assim que submetidos a compactação. Mesmo com a aplicação uniforme do aglutinante, não cobre todas as áreas e favorece ao colapso do molde ou macho, sendo esse tipo de grão não usado na área da fundição (OLIVEIRA, 2013).

3 JUSTIFICATIVA

A caracterização das cinzas descartadas é importante para que reduza o custo de produção de painéis de madeira, para que as cinzas que atualmente são pagas para serem descartadas conforme normas e legislações municipais, estaduais e nacionais vigentes, torne-se um sub produto do processo o qual possa ser vendido para outros ramos da indústria, tais como área de fundição, cerâmica e construção civil.

Isso é importante para a área da Ciência dos Materiais e para Processos de Fabricação, como a Fundição, pois se as propriedades físicas e de formação da cinza forem compatíveis com a literatura, pode ser uma nova fonte de sílica para moldes e machos evitando a degradação do meio ambiente, mesmo sendo essa matéria prima abundante no solo terrestre.

Leva a aprofundar os conhecimentos sobre esses materiais devido a quantia de cinza que é gerada pela queima de resíduos de madeira, saber qual a sua origem ou fonte de geração das cinzas, a viabilização de reutilização dessa cinza para fins mais específicos que aquele já citado na literatura como complemento ou carga para pavimentação asfáltica, construção de tijolos ou para utilização no concreto nas obras da Engenharia Civil e também gerar reduções de custo para a empresa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Em materiais e métodos, citam os principais ensaios para analisar as propriedades do resíduo descartado, como baseia-se a difratometria de raio-x, quais os métodos utilizados nesse trabalho para análise das cinzas segundo normas para ensaio de areias-base. Uma última etapa a realizar, é a medição dos dados do processo para quantificação da biomassa consumida e cinza gerada pela unidade de tempo.

4.1 DIFRATOMETRIA DE RAIO X

É uma das técnicas mais importantes para a caracterização micro estrutural dos materiais cristalinos, sendo amplamente usada tanto pelas engenharias de matérias, de minérios, metal mecânica, como pelas geociências, baseia-se na emissão de ondas de raio-x sobre uma estrutura, quando esses raios atingem o átomo, eles podem ser espalhados elasticamente sem que ocorra a perda de energia. Os fótons de raio-x depois de colidirem com o elétron, mudam de direção, mas mantêm a mesma fase e energia do raio incidente. Pode-se dizer que a onda eletromagnética é absorvida pelo elétron e retransmitida de tal maneira que cada elétron como uma fonte emissora de raio-x (KAHN, 2009).

Caso os átomos estejam arranjados ordenadamente, como em um estrutura cristalina, com distancias próximas ao comprimento de onda do raio incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos ficam periódicas e as difrações podem ser observadas em vários ângulos (KAHN, 2009).

Considerando dois ou mais planos da estrutura cristalina, as condições para que haja difração (interferência construtiva, mesma fase e soma das amplitudes da onda) vão depender da distância percorrida pelo raio-x e pelo comprimento de onda do raio incidente. Isso pode ser expresso pela Lei de Bragg, equação 1:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad \text{Equação 1}$$

Onde

λ é o comprimento de onda incidente;

n , número inteiro relativo a ordem de difração;

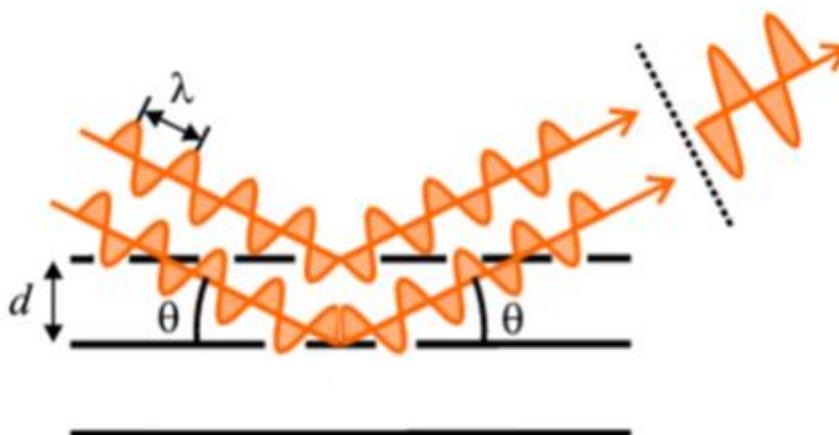
d , distância interplanar dos átomos;

θ , ângulo de incidência de raio-x.

A intensidade difratada depende do número de elétrons no átomo, como estão distribuídos no arranjo e das densidades de átomos e elétrons na estrutura cristalina, fazendo com que as intensidade também possam ser diferentes para outros planos cristalinos (KAHN, 2009).

A figura 3 mostra a esquerda os raios incidentes e a direita a somatória dos raios difratados.

Figura 3: Esquema de difração de raio-x sobre estrutura cristalina



Fonte: Queiroz et al (2015)

4.2 ENSAIOS DE AREIA A VERDE

As areias testadas em laboratório devem ser submetidas a diversos testes, dentre eles:

- Grau de impurezas
- Teor de argila
- Permeabilidade
- Refratariedade
- Teor de umidade e carbono
- Granulometria, concentração e finos
- Coesão
- Plasticidade

Para a caracterização das cinzas, os principais testes serão: teor de argila AFS (*American Foundry Society*), o teor de umidade, teor de carbono, granulometria, concentração e teor de finos.

4.2.1 Teor de Argila AFS

Para determinar o teor de argila, toma-se como base a massa de amostra de 50 g de areia seca, segue então uma reação com 5% de pirofosfato de sódio em 10 ml de água destilada deixando ferver por 5 minutos.

Depois agitada a areia em água destilada por 5 minutos, seguido de um repouso de 10 minutos, para sedimentar todas as partículas de argila com diâmetro menor que 0,02 mm, separando a argila da areia por um sifão normalizado através de sucção. Repetida 5 vezes (no mínimo) o processo descrito, seca a areia restante a temperatura de 110 °C e mede-se a massa final (Q), obtendo assim o teor de argila (FERREIRA, 2010).

O valor do teor de argila é expresso pela equação 2:

$$A = \frac{50 - Q}{Q} \cdot 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

A é o teor de argila em porcentagem;

Q é a massa restante do processo de separação da argila em uma massa padrão de 50 g.

4.2.2 Distribuição Granulométrica e Índice de Finura

A granulometria define as dimensões dos grãos que compõe a areia, definida pelas massas de areia lavadas, secas, sem finos, retidas nas telas normalizadas agitadas no tempo de 15 minutos. Existem duas normas a AFS e DIN (*Deutsches Institut für Normung*), sendo no Brasil adotada a norma AFS. Cada malha tem uma área de abertura e também um fator multiplicativo (M) correspondente na tabela 3:

Tabela 3: Peneiras e fator multiplicativo AFS

Peneira N ^o	Abertura da malha [mm]	Fator Multiplicativo [M]
6	3,36	3
12	1,68	5
20	0,84	10
30	0,59	20
40	0,42	30
50	0,297	40
70	0,210	50
100	0,149	70
140	0,105	100
200	0,074	140
270	0,053	200
Fundo	-	300

Fonte: Ferreira (2010)

Para a fundição utiliza-se o índice de finura, equação 3, que é obtido pelo somatório dos produtos da massa em cada peneira e seu fator multiplicativo, dividido pela porcentagem de areia inicial livre da porcentagem de argila (100 – A). O índice de finura é relacionado com a superfície específica da areia, quanto maior o índice de finura, mais fina a areia e maior sua superfície específica.

$$f = \frac{\sum \%q \cdot M}{(100 - A)} \quad \text{Equação 3}$$

A tabela 4 trata as areias conforme o índice de finura.

Tabela 4: Classificação das areias e módulo de finura

Classificação	Módulo de Finura
Grossa	30 a 50
Média	51 a 70
Fina	71 a 100
Muito Fina	101 a 150
Finíssima	Acima de 150

Fonte: Oliveira (2013)

4.2.3 Teor de Finos e Teor de Concentração

Teor de fino é aquele material que passa através da peneira 140 malhas, reduzem a expansão da areia, mas também dificulta a permeabilidade.

As areias para fundição devem uma boa permeabilidade e baixa expansão, para isso a maioria dos grãos deve estar acima de 50% e menos de 70%. A concentração é o percentual máximo de areia retida em 3 peneiras consecutivas. Uma areia com valores acima de 70% de concentração, tende a ter uma alta expansão do molde (OLIVEIRA, 2013).

4.2.4 Teor de Umidade

A umidade nas areias influenciam diretamente a propriedade de resistência mecânica, quanto maior a umidade, menor a resistência a verde, tanto para formatos angulares como para grãos redondos, porém quando os grãos são mais redondos, a resistência a verde dobra seu valor.

A resistência a verde também é comprometida pela umidade quando relacionada ao tamanho do grão, quanto maior, mais resistente a areia é. Para valores entre 1,7 e 2% de umidade o valor de resistência é máximo, tendo a diminuir com aumento da umidade (OLIVEIRA, 2013).

Para determinação do teor percentual de umidade, ou de carbono, usa-se a equação 4:

$$Umidade\ ou\ Carbono = \frac{(massa\ inicial - massa\ final)}{massa\ inicial} \cdot 100 \quad \text{Equação 4}$$

4.3 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE BIOMASSA E DE CINZA

Para a quantificação da quantidade de cinzas geradas pela biomassa consumida, será preciso saber a quantia de combustível levado a fornalha (Q_{bm}), expresso em metros cúbicos por segundo. Serão importantes os dados construtivos do equipamento de alimentação de combustível a fornalha.

A quantia de biomassa levada a fornalha, expressa em m^3/s é representada pela equação 5:

$$Q_{bm} = V_L \times A_T \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

V_L é a velocidade linear do transportador em m/s;

A_T é a área da tira metálica que faz o arrasto da biomassa em m².

Para o cálculo de A_T , basta multiplicar a largura l pela altura h da chapa que transporta a biomassa.

Já para o cálculo de V_L , desenvolvida em função da rotação convertida de rpm para hertz e do diâmetro primitivo da engrenagem, mostrada na equação 6:

$$V_L = \frac{\pi \times N_s \times d_p}{60} \quad \text{Equação 6}$$

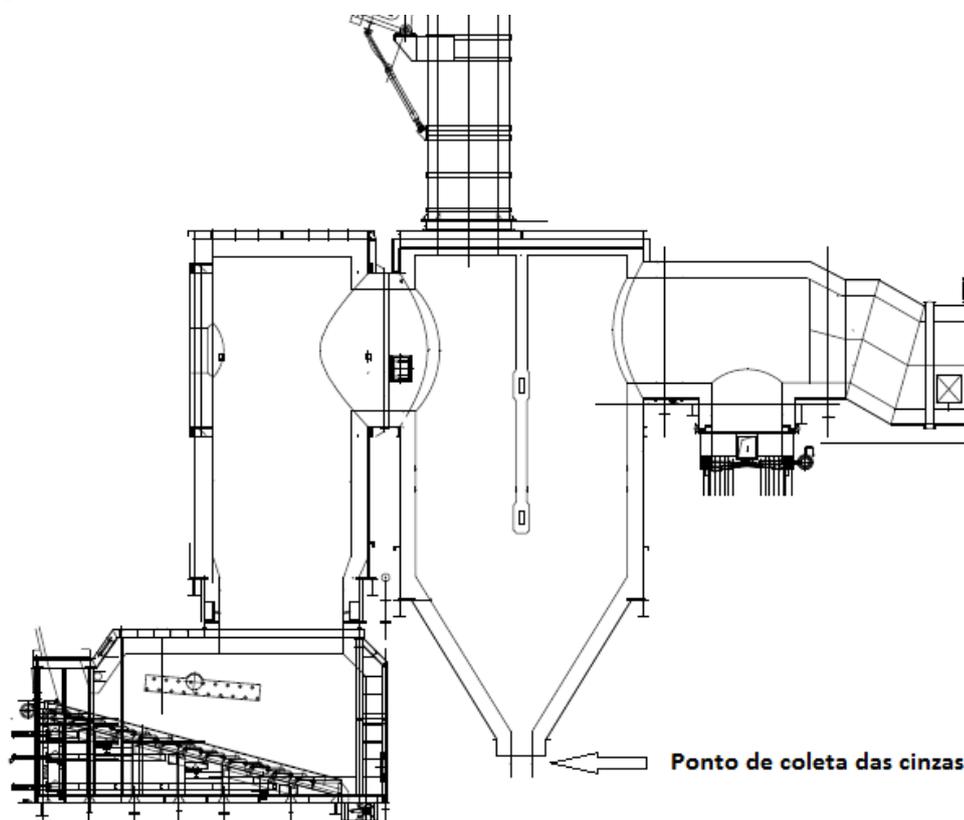
Onde:

N_s é a rotação do redutor em rpm;

d_p é diâmetro primitivo da engrenagem que aciona as correntes.

Para a determinação de cinzas descartadas, a medição será da seguinte forma, uma caixa metálica feita em aço galvanizado, aberta no topo, cobrindo toda a área do duto de saída, com as medidas de 350 mm de altura, 600 mm de comprimento e 380 mm de largura, será instalada numa janela de inspeção (figura 4). Essa caixa ficará por uma hora no processo, depois agitada por um tempo de 5 minutos para nivelar a altura correspondente, apresentando um volume referente ao que seria descartado.

Figura 4: Ponto de coleta das cinzas



Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades da cinza em estudo foram determinadas numa primeira etapa na sua forma recém coletada, a importância da quantidade que é gerada através dos dados das máquinas, para verificar os teores de umidade, carbono e a distribuição granulométrica. Depois duas amostras foram enviadas para institutos diferentes, uma para determinar o teor de argila e distribuição granulométrica e outra para análise de difração de raio-x.

5.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE BIOMASSA E DE CINZA

Os dados do transportador de correntes, obtidos pelos desenhos técnicos e diagramas, são:

- Rotação saída: 24 rpm (N_s)
- Largura do transportador: 1070 mm (l)
- Altura do transportador: 101,6 mm (h)
- Diâmetro primitivo da engrenagem: 261,3 mm (dp)

O motor tem velocidade constante, possui partida direta e a alimentação de biomassa somente ocorre com confirmação do sistema transportador em funcionamento e outras condições operacionais além das condições de segurança.

Aplicando em (5) e depois em (4), tem-se o valor da vazão volumétrica de biomassa em 0,03569 m³/s.

Com dados estatísticos fornecidos pelo sistema supervisor da planta térmica, o tempo que as válvulas ficam ligadas para alimentar o transportador durante uma hora é de 949 segundos em média, sabe-se que o fluxo volumétrico em uma hora equivale a 33,88 m³. Os dados estatísticos foram feitos por um período de 2 meses, registrando o funcionamento das válvulas por 24 horas.

A caixa metálica foi deixada por uma hora no duto de saída, onde apresentou uma altura média de 291 mm, totalizando um volume de 0,0664 m³ e massa líquida de 53,1 kg, sendo separado para ensaio 0,0048 m³ (4,8 litros).

5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA CINZA

O teor de umidade foi realizado no laboratório de ensaios de areia de fundição na UTFPR, campus Ponta Grossa. Utilizou-se para o procedimento, o repartidor de amostra, a balança de precisão em centésimos, o secador de estufa e cadinhos.

5.2.1 Quartejamento da Amostra

O volume de 4,8 litros foi quartejado a cada duas partes e separada até atingir três montantes: 600 gramas para ensaio de teor de carbono, umidade e distribuição granulométrica comparativa, 150 gramas para difratometria de raio-x e 300 gramas para ensaio de Argila AFS e distribuição granulométrica real.

5.2.2 Teor de Umidade

Para a secagem da amostra foi utilizado o secador de estufa, a massa inicial de 250,01 gramas foi depositada em um cadinho e aquecida a temperatura de 120 °C por uma hora, depois desse período feita a medição da massa que apresentou o valor de 249,34 gramas, retornando a estufa por mais meia hora para verificar não haveriam variações da massa.

Decorridos 30 minutos, a massa foi medida, apresentando o valor de 249,32 gramas, indicando estabilidade e sem presença de umidade.

O teor de umidade da amostra foi de 0,28%, utilizando a equação (3).

Todavia, o dia em que foi dada sequência aos procedimentos, verificou-se que houve um aumento da massa para 249,65 gramas (o dia estava úmido, provavelmente houve absorção de umidade durante a execução deste procedimento).

5.2.3 Teor de Carbono

Para determinar a quantia de carbono existente na amostra, uso da equação (3), foi separado uma quantia de 10,01 gramas em cadinho, aquecido a 920 °C por 3 horas e depois de resfriado.

A massa inicial de 10,01 gramas reduziu para a quantia de 9,98 g, resultando no teor de carbono de 0,29%.

5.2.4 Distribuição Granulométrica Inicial

Foi realizado peneiramento vibratório de 120 gramas de cinzas, utilizando a série padrão de fundição pelo período de 15 minutos, conforme norma ABNT NBR ISO 3310-1-2010.

Cada peneira passou por um processo de limpeza com pincel nas bordas internas, tela e bordas externas. A massa de cada peneira vazia foi anotada. Então, por subtração determinou-se o valor de massa retida em cada peneira.

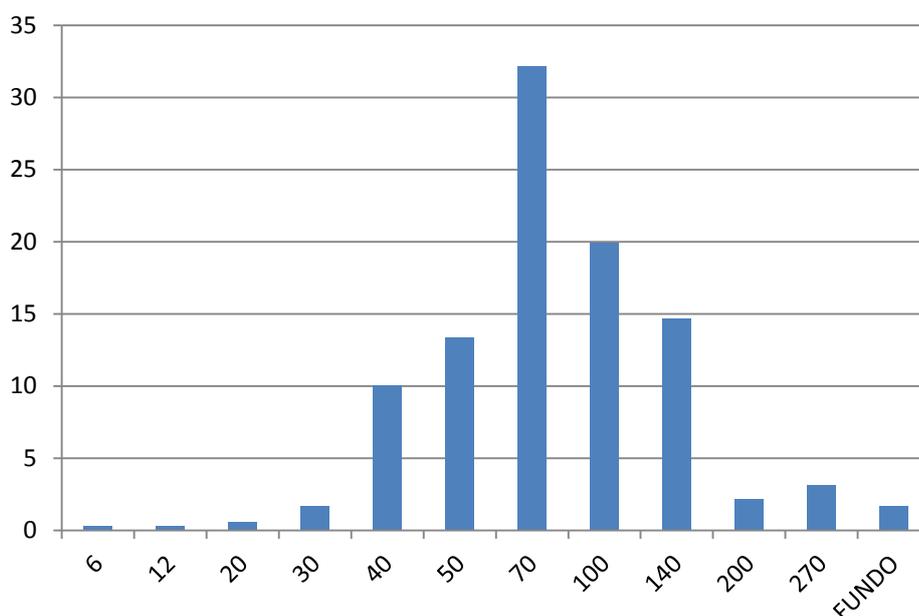
A tabela 5 indica os valores das massas no processo de determinação da distribuição granulométrica.

Tabela 5: Distribuição granulométrica recém coletada

Peneira N°	Abertura [mm]	Massa peneira [g]	Massa total [g]	Retida [g]	Retida [%]	Fator multiplicativo	Produto [%]	Acumulado [%]
6	3,36	389,42	389,78	0,36	0,30	3	0,9	0,30
12	1,68	327,83	328,18	0,35	0,29	5	1,46	0,59
20	0,84	367,88	368,53	0,65	0,54	10	5,41	1,13
30	0,59	336,32	338,37	2,05	1,71	20	34,11	2,84
40	0,42	326,57	338,61	12,04	10,02	30	300,47	12,85
50	0,297	323,01	339,12	16,11	13,40	40	536,06	26,25
70	0,210	314,02	352,69	38,67	32,17	50	1608,44	58,42
100	0,149	306,28	330,28	24,00	19,97	70	1397,55	78,39
140	0,105	300,27	317,91	17,64	14,67	100	1467,43	93,06
200	0,074	290,03	292,63	2,60	2,16	140	302,80	95,23
270	0,053	294,07	297,83	3,76	3,13	200	625,57	98,35
Fundo	-	304,75	306,73	1,98	1,65	300	494,14	100
				Total	100		6774,34	

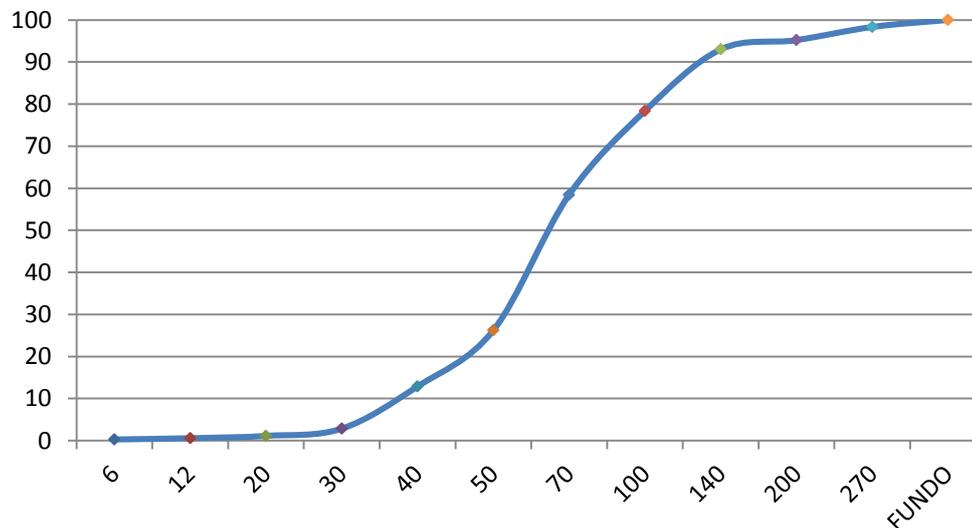
Fonte: Autoria própria

A distribuição de massa (em porcentagem) em cada peneira pode ser visualizada conforme gráfico 1:

Gráfico 1: % Distribuição de massas recém coletada

Fonte: Autoria própria

O gráfico 2 representa o acumulado ao longo das peneiras.

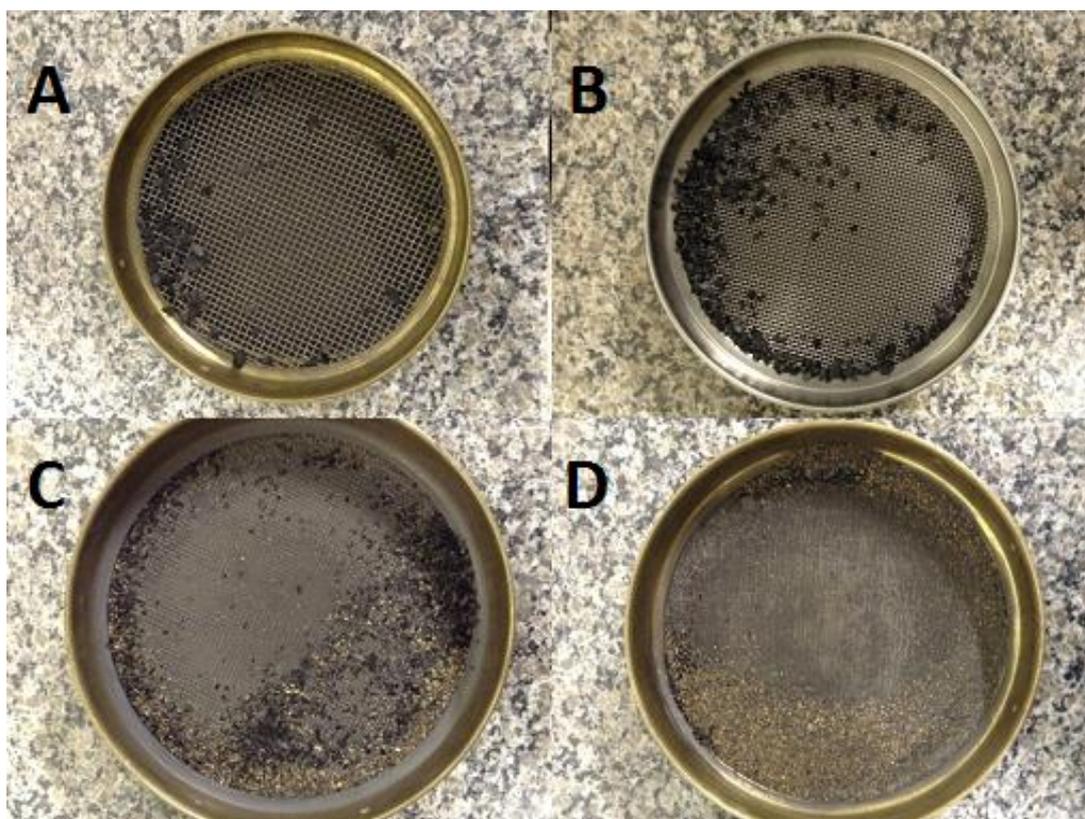
Gráfico 2: % Acumulada de massas recém coletada

Fonte: Autoria própria

A partir da distribuição granulométrica, pode-se então determinar a concentração e o teor de finos. O valor de concentração para as cinzas nesta etapa é de 65,54 % e o teor de finos é de 6,94%.

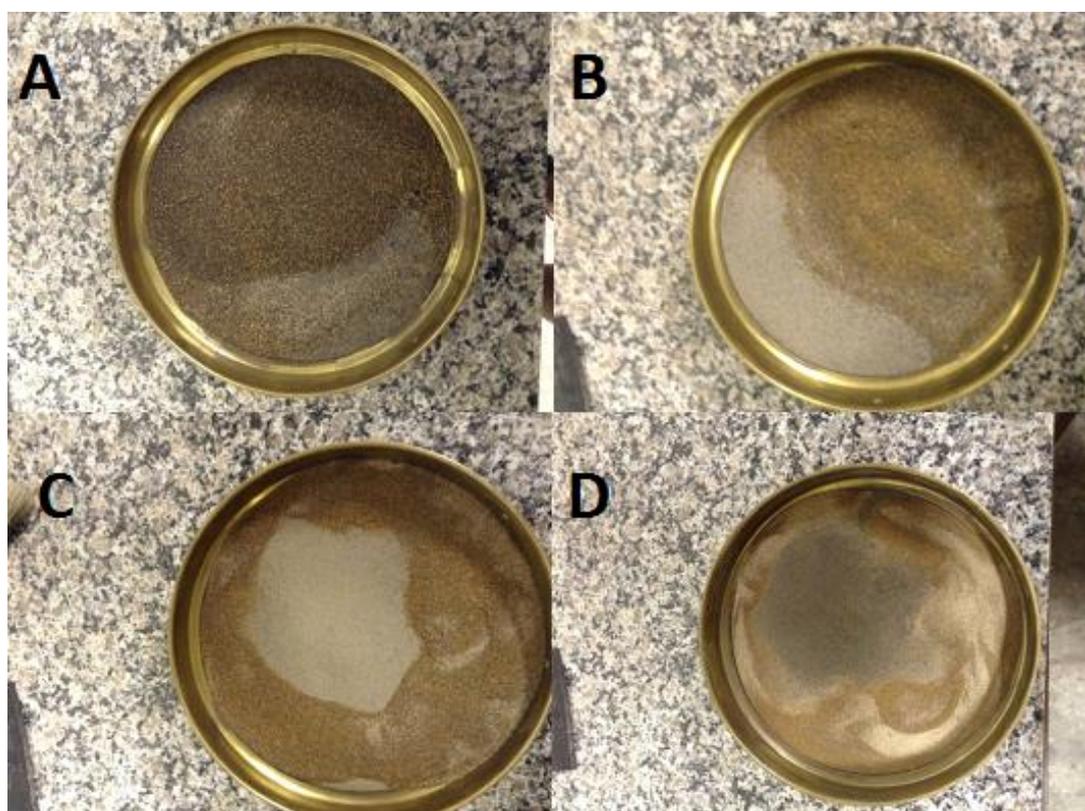
As figuras 5 a 8 correspondem as fotos das peneiras e as amostra de cinzas que ficaram retidas.

Figura 5: Peneiras 6 (A), 12 (B), 20 (C) e 30 (D)



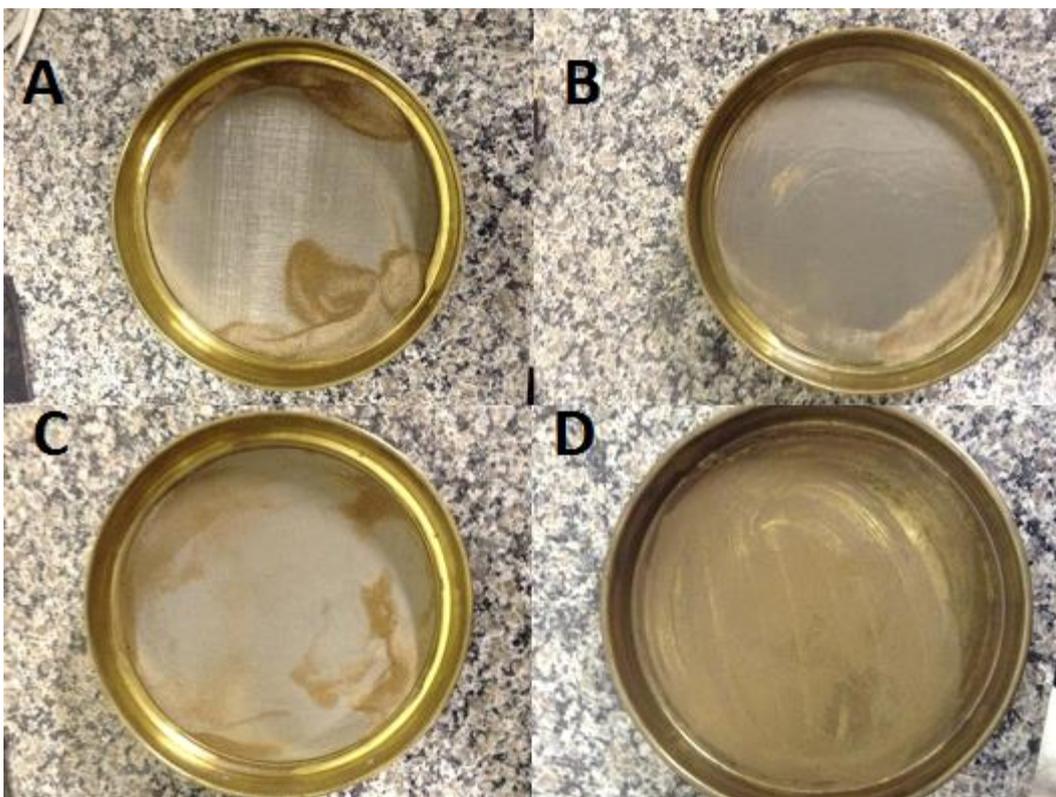
Fonte: Autoria própria

Figura 6: Peneiras 40 (A), 50 (B), 70 (C) e 100 (D)



Fonte: Autoria própria

Figura 7: Peneira 140 (A), 200 (B), 270 (C) e Fundo (D)



Fonte: Autoria própria

Figura 8: Fundo limpo



Fonte: Autoria própria

Pode-se notar que praticamente em todas as malhas, há a presença de material orgânico, isso pode alterar os valores do índice de finura. Possivelmente a presença

desses compostos orgânicos, como carbono não queimado e lascas de madeira, deve-se a uma combustão não completa dentro da câmara de combustão.

5.2.5 Teste do Teor de Argila

Para a determinação da argila AFS, uma amostra foi enviada ao laboratório em Batatais – SP, onde o procedimento foi realizado, o laudo segue no anexo A.

As informações recebidas revelam que as cinzas apresentam um percentual de argila AFS correspondente a 1,79, sendo que o número de ciclos de sifonamentos foram 20 ao total.

5.2.6 Módulo de Finura

Uma outra amostra foi enviada para realizar além da argila AFS, a distribuição granulométrica e o módulo de finura real, para comparar com a cinza recém coletada e para saber a quantia de material orgânico presente.

A tabela 6 (junto com o anexo B), mostra as novas distribuições em cada peneira.

Tabela 6: Distribuição granulométrica após teor de argila

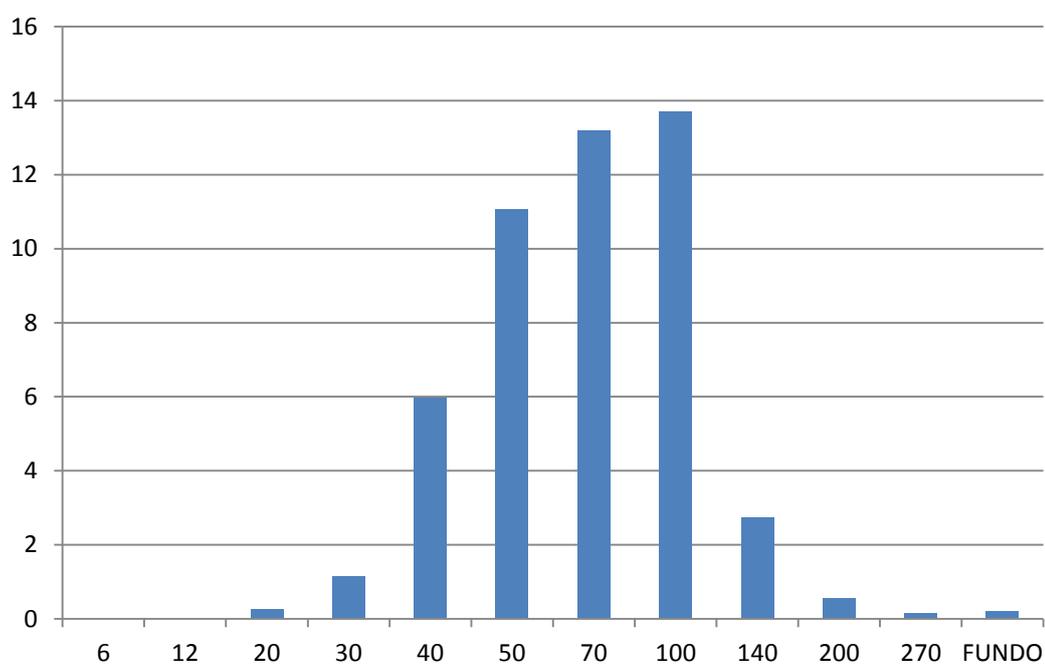
Peneira Nº	Abertura [mm]	Retida [%]	Fator multiplicativo	Produto [%]	Acumulado [%]
6	3,36	0	3	0	0
12	1,68	0	5	0	0
20	0,84	0,27	10	2,7	0,27
30	0,59	1,14	20	22,8	1,41
40	0,42	5,96	30	178,8	7,37
50	0,297	11,05	40	442	18,42
70	0,210	13,20	50	660	31,62
100	0,149	13,69	70	958,3	45,31
140	0,105	2,73	100	273	48,04
200	0,074	0,54	140	75,6	48,58
270	0,053	0,14	200	28	48,72
Fundo	-	0,20	300	60	48,92
Total		48,92		2701,2	

Fonte: Autoria própria

A concentração correspondente a cinza depois de sifonada é de 37,94 %, o teor de finos de 0,88 % e obtém-se agora o módulo de finura que equivale a 55,22.

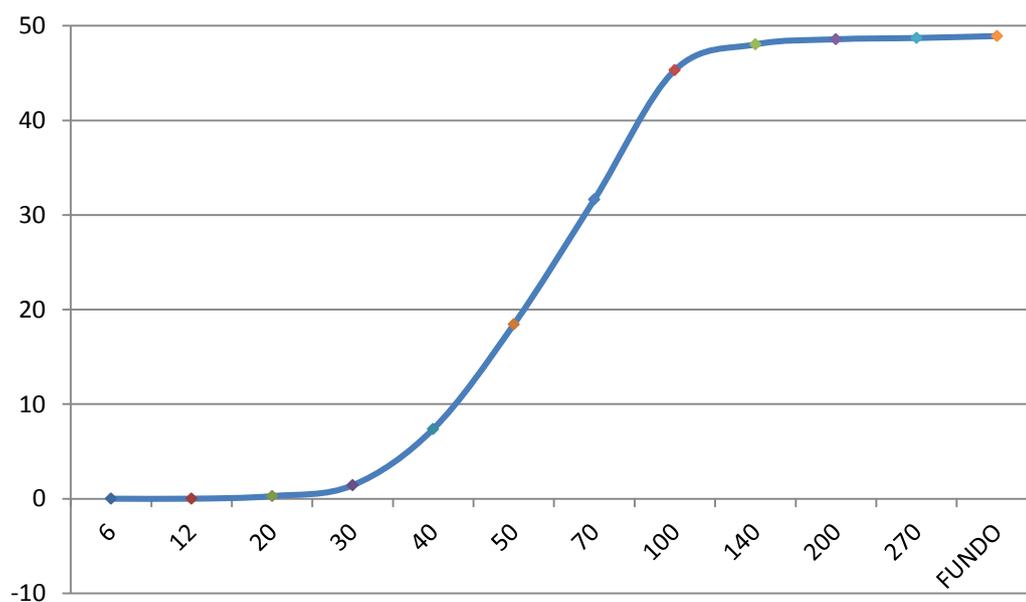
Os gráficos 3 e 4 mostram a nova distribuição e o acumulado percentual em cada peneira.

Gráfico 3: % Distribuição de massas real



Fonte: Autoria própria

Gráfico 4: % Acumulada de massas real



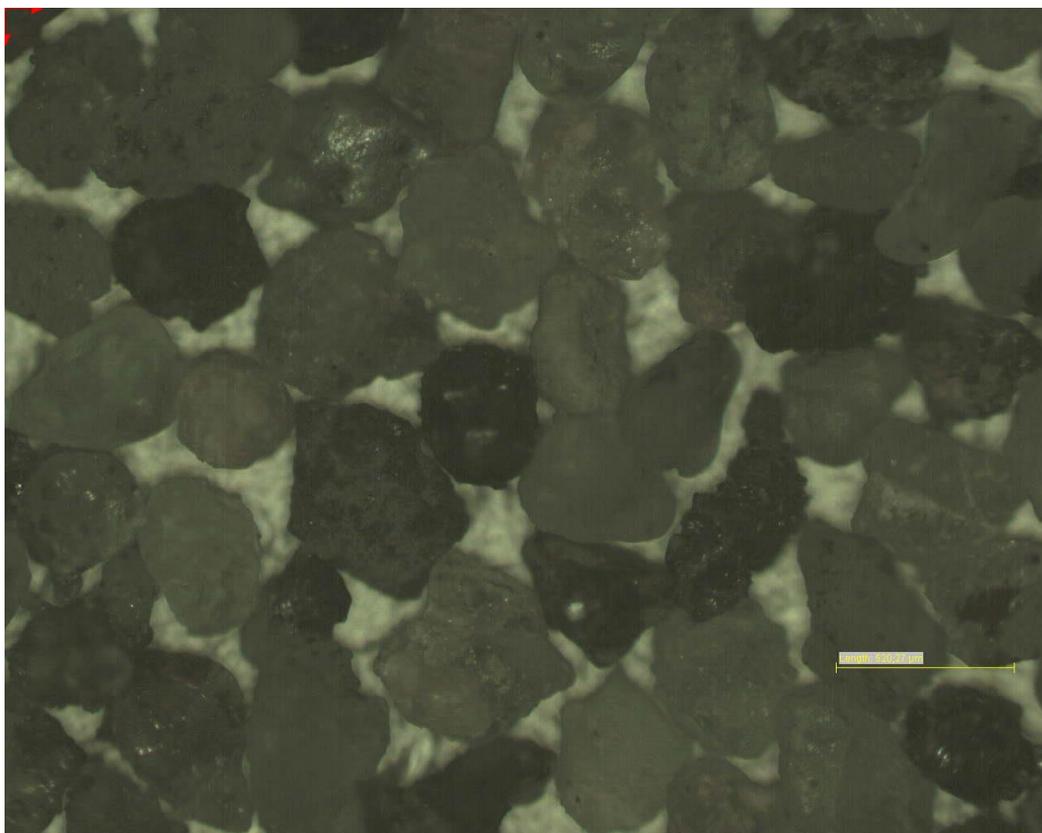
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que a ausência de material orgânico, a curva de massa acumulada apresentou uma melhor linearidade tanto na concentração das peneiras de malha 50, 70 e 100, assim como nas peneiras que retêm os materiais mais finos.

5.2.7 Formato dos grãos

Os grãos foram microfotografados com aumento de 50 vezes com luz transmitida, relacionado a peneira que apresentou maior concentração final, malha 100, mas com a amostra que foi usada para distribuição granulométrica inicial, portanto com presença de material orgânico.

Figura 9: Microfotografia da amostra



Fonte: Autoria própria

Observa-se na figura 9 que o material orgânico (grãos em preto) está presente e em formatos mais angulares. O material inorgânico (grãos em cinza) é predominantemente do formato arredondado e semi arredondado, possivelmente pelo crescimento da sílica dentro da madeira e pela ação de transporte e erosão dentro do duto de gás quente.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA FASE PRESENTE

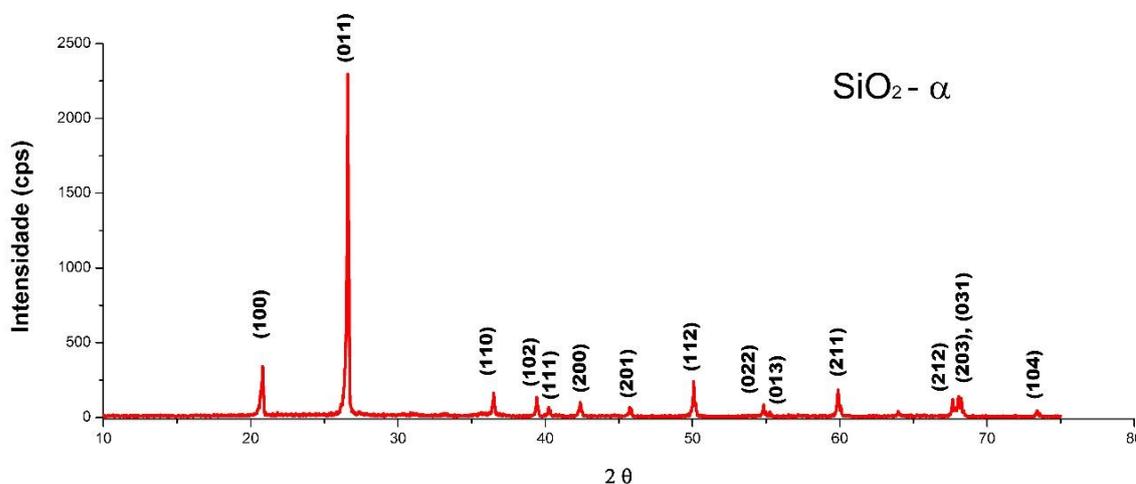
A última amostra da cinza foi enviada ao laboratório de materiais da UEPG, onde uma difratometria de raio-x foi realizada. Esse ensaio foi feito em conjunto com uma tese de mestrado (na UEPG) de um supervisor de produção, com a finalidade de utilizar a cinza como carga em compósitos, tanto a cinza de fundo como a cinza volante.

Os dados das cinzas volantes foram compilados com ajuda do professor orientador, dessa maneira foi possível comparar as informações da amostra com a base de dados de materiais cristalinos inorgânicos, obtendo informações como densidade, a fase presente e composição da cinza.

As informações da base de dados que serviu como comparação segue ao anexo c.

O gráfico 5 mostra a intensidade dos picos em função dos ângulos de difração 2θ nas cinzas volantes.

Gráfico 5: Intensidade de picos



Fonte: Autoria própria

Comparada a base de dados ficha ICSD padrão (PDF Number 78-1252), pode-se afirmar que as cinzas volantes são constituídas basicamente por dióxido de silício, ou sílica alfa (SiO₂) de baixo quartzo com densidade de 2640 kg/m³.

6 CONCLUSÕES

O volume de material gerado foi de 0,0664 m³ para 33,88 m³ de biomassa por hora. Assim, são produzidos 0,00196 m³ de cinza por cada metro cúbico de biomassa alimentada ao queimador por hora. Gerando no mês, um montante de 46,368 m³ mensais de cinzas volantes que são descartadas pelo cone separador.

A cinza processada possui um módulo de finura 55,77, sua concentração corresponde a 37,94%, presente na sua maioria nas peneiras de malha 50, 70 e 100, o teor de finos é de 0,88% e a presença de argila AFS é de 1,79%, areia siliciosa precisando de aditivos para moldagem na fundição, os valores foram obtidos em ensaio onde realizou-se 20 etapas de sifonamento. Nota-se que a parcela de material orgânico geral, composto por partículas de madeira e carbono não queimado, equivale a 48,92% da massa de cinza volante gerada, isso deve-se a uma mistura pobre da relação ar-combustível para o queimador. Somente o total de cinza volante inorgânica gerada por mês equivale a 22,683 m³.

O material presente na cinza como composto inorgânico, determinada pelo difratômetro de raio-x, é dióxido de silício (SiO₂, sílica) alfa, baixo quartzo, com 99% de precisão, comparada a base de dados da ficha ICSD padrão número 78-1252.

O material inorgânico separado das cinzas tem um grande potencial para uso como areia base para fundição, porém por ser caracterizada como baixo teor de argila, há a necessidade de adição de aditivos caso seja usada como areia verde, ou até mesmo utilizada nessa forma bruta como processos de fundição com silicato de sódio.

A microfotografia dos cristais mostra que sílica pode ser destinada a fabricação de moldes, já que possuem o formato arredondado e semi arredondado, que facilita permeabilidade do gás dentro molde.

Para outras aplicações também pode ser enquadrada a sílica conforme já estudado, mas foi enfatizado o uso nos processos de fundição, como nova alternativa de fonte de matéria prima, pois procede de origem orgânica. Outro detalhe a ser levado em consideração é um cálculo de engenharia econômica na qual determinará quanto a empresa tende a receber com o investimento em máquinas e a venda desse material, pois hoje é pago para destinação conforme legislação vigente atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIFA APEX, **Prospecção do mercado internacional de fundidos ferroso e não ferrosos**, apresentação de slides, Setepla Tecnometal Engenharia, 2006.

AMMEN, C. W., **The complete handbook of sand casting**, 238 páginas, USA, TAB Books, 1979.

BON, A. M.T., SANTOS, A.M. A. **Sílica, Silicose, Medidas Básicas de prevenção**. Disponível em <<http://www.fundacentro.gov.br/silica-e-silicose/silica>>. Acesso em 14 agosto de 2016.

CHAVES, Marcia Rodrigues de Moraes. **Preparação de Sílica Organofuncionalizada a partir de casca de arroz, com capacidade adsorvente de íons metálicos**. 2008. 118 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G., **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação da amostra**. 60 p., Porto Alegre, EDIPUCRS, 2007.

FAUTEUX, F. Et al. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. **FEMS Microbiol. Lett.**, Vol. 249, n. 1, pag. 1-6, 2005.

FERREIRA, J. M. G. C., **Tecnologia da Fundição**, 544 p., 3ª edição, Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

FOLETTTO, Edson L., HOFFMANN, Ronaldo, HOFFMANN, Rejane S., PORTUGAL JR., Utinguassú L., JAHN, Sergio L., Aplicabilidade das Cinzas da Casca de Arroz. *Química Nova*, pag 1055-1060, Vol 28, No 6, 2005.

GIRÓN, R. P., RUIZ, B., FUENTE, E., GIL, R. R., SUÁREZ-RUIZ, I., **Properties of fly ash from forest biomass combustion**. Instituto Nacional del Carbón, CSIC, Oviedo, Spain, Fuel p.71-77, 2012.

ILER, R. K. **The chemistry of silica**. New York: John Miley & Sons, 1979.

JAMES, A. K., THRING, R. W., HELLE, S., GHUMAN, H. S., **Ash management review – Applications of biomass bottom ash**. University of Northern British Columbia, Canada. Energies, 2012.

KAHN, H., **PMI2201-Técnicas de Caracterização de Materiais**. Apostila técnica, Escola Politécnica-USP, 2009. Disponível em:< <http://www.ebah.com.br/difracao-de-raio-x-pdf-a94808.html>>. Acesso em maio de 2017.

MADSEN, Ole H. **Advanced combustion technology for a bioethanol plant**. Babcock e Wilcox A/S. 5 pag, Dinamarca, abril de 2012.

PATWARDHAN, S. V., CLARCSO, S. J. Silicification and biosilicification. **Silicon Chem.**, Vol. 1, pag. 207-214, 2002.

POULSEN, N., SUMPER, M., KRÖGEN, N. Biosilica formation in diatoms: characterization of native silaffin-2 and its role in silica morphogenesis. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, Vol 97, n. 26, pag 14133-14138, 2000.

PROTÁSIO, T. P., TONOLI, G. H. D., GUIMARÃES JR., M., BUFALINO, L., COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., **Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos**. Cerne, Lavras, p. 433-439, jul/set. 2012.

OLIVEIRA, B. Ferraz de. **Fundição / Bruno Ferraz de Oliveira**. Universidade Federal de Santa Maria, Colegio Técnico Industrial, Rede e-Tec Brasil, 108 p., Santa Maria, 2013.

OLIVEIRA, I. Luiz de, **Moldagem**. Notas de aula, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, 75 p, Ponta Grossa, 2014.

QUEIROZ, A., KUROSAWA, R., BARRETO, R., **Difração de Raio-X**. Laboratório Avançado de Física Computacional, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 34 p., 2015

RAYAPROLU, Kumar, **Boyle for Power and Process**., CRC Press, Taylor & Francis Group, 745 p, USA, 2009.

SHAFIZADEH, F. **Basic principles of direct combustion**. In: SOFER, S. S.; ZABROSKY, O. R. (Ed). p. 103-112, Biomass conversion process for energy and fuels. New York: Plenum, 1981.

SHIN, Donghoon, CHOI, Sangmin. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. **Combustion and Flame**, pag 167-180, Vol 121, 2000.

SOUZA, Josiane Carneiro, **Reutilização de Areia Verde Descartada de Fundição Ligada com $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ na Preparação de Moldes Não Permanentes**. 2012, 99 p, Tese (Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

STULTZ, S. C. **Steam: Its Generation and Use**. Babcock e Wilcox A/S. 1064 pag, 40ª edição, 1992.

YIN, Chungen, ROSENDAHL, Lasse A., KAER, Soren K. Grate firing of biomass for heat and power production. **Progress in Energy and Combustion Science**. Aalborg East, pag 725-754, Vol 34, 2008.

ANEXO A - Análise de areia: Argila AFS

ANÁLISE DE AREIA

De: **MARCO – Assessoria em areia de moldagem a verde**

Nº 01 / 16

Empresa:

At.: **Roger**

Amostra: areia para análise

ENSAIOS	Orientativo	Obtido em: 24/09/16	Obtido em:	Obtido em:
Compactabilidade (%)	-	-		
Umidade Real (%)	-	-		
Umidade (%) em Cpt=45%	-	-		
R.C.V. (gr/cm ³)	-	-		
R.C.F. (gr/cm ²)	-	-		
R.C.C. (gr/cm ²)	-	-		
Plasticidade (%)	-	-		
Permeabilidade (AFS)	-	-		
Argila Ativa (%)	-	-		
Argila AFS (%)	-	1,79		
Nº de sifonamentos	-	20		
Relac. argilas AFS / ativa	-	-		
Modulo de finura	-	-		
Finos (%)	-	-		
Voláteis (%)	-	-		
Perda ao Fogo (%)	-	-		
Relac. perda ao fogo/voláteis	-	-		
Finos inertes (%)	-	-		
Dureza corpo de prova	-	-		
Peso do corpo de prova	-	-		
pH	-	-		
Partículas magnéticas (%)	-	-		
Areia Nova (%)	-	-		
“Água livre” (%)	-	-		
COMPOSIÇÃO DA MISTURA ATUAL				
Bentonita (Kg)	-	-		
Cardiff (Kg)	-	-		
Dextrina (Kg)	-	-		
Areia base (kg)	-	-		
Areia retomo (kg)	-	-		
Adição de água (litro)	-	-		
Tempo de mistura (total)	-	-		

Nota:

R.C.V. = Resistência a compressão a verde

R.C.F. = Resistência a compressão a fissuração

R.C.C. = Resistência a compressão ao cisalhamento


 Marco Antônio Alves
 Analista Químico

Especialista em Areia de moldagem a Verde
CRQ – 04452588

Doc. 004/C - Revisão 30/08/2016 (7)

MARCO – Assessoria em areia de moldagem a verde

(16) 9142-6548

1

Rua Arthur Lopes de Oliveira, 974 - CEP - 14300-000 - Batatais – SP- contato@areiaverde.com – www.areiaverde.com

ANEXO B - Análise de areia: módulo de finura e distribuição granulométrica

ANÁLISE DE AREIA

De: **MARCO – Assessoria em areia de moldagem a verde**

Nº 01 / 16

Empresa:

At.: **Roger**

Amostra: areia para análise

ENSAIOS	Orientativo	Obtido em: 10/10/16	Obtido em:	Obtido em:
Compactabilidade (%)	-	-		
Umidade Real (%)	-	-		
Umidade (%) em Cpt=45%	-	-		
R.C.V. (gr/cm ²)	-	-		
R.C.F. (gr/cm ²)	-	-		
R.C.C. (gr/cm ²)	-	-		
Plasticidade (%)	-	-		
Permeabilidade (AFS)	-	-		
Argila Ativa (%)	-	-		
Argila AFS (%)	-	1,79		
Nº de sifonamentos	-	20		
Relac. argilas AFS / ativa	-	-		
Modulo de finura AFS	-	55,22		
Finos (%)	-	0,88		
Voláteis (%)	-	-		
Perda ao Fogo (%)	-	-		
Relac. perda ao fogo/voláteis	-	-		
Finos inertes (%)	-	-		
Dureza corpo de prova	-	-		
Peso do corpo de prova	-	-		
pH	-	-		
Partículas magnéticas (%)	-	-		
Areia Nova (%)	-	-		
“Água livre” (%)	-	-		

COMPOSIÇÃO DA MISTURA ATUAL

Bentonita (Kg)	-	-		
Cardiff (Kg)	-	-		
Dextrina (Kg)	-	-		
Areia base (kg)	-	-		
Areia retomo (kg)	-	-		
Adição de água (litro)	-	-		
Tempo de mistura (total)	-	-		

Nota:

R.C.V. = Resistência a compressão a verde

R.C.F. = Resistência a compressão a fissuração

R.C.C. = Resistência a compressão ao cisalhamento

Doc. 004/C - Revisão 30/08/2016 (7)

MARCO – Assessoria em areia de moldagem a verde

(16) 9142-6548

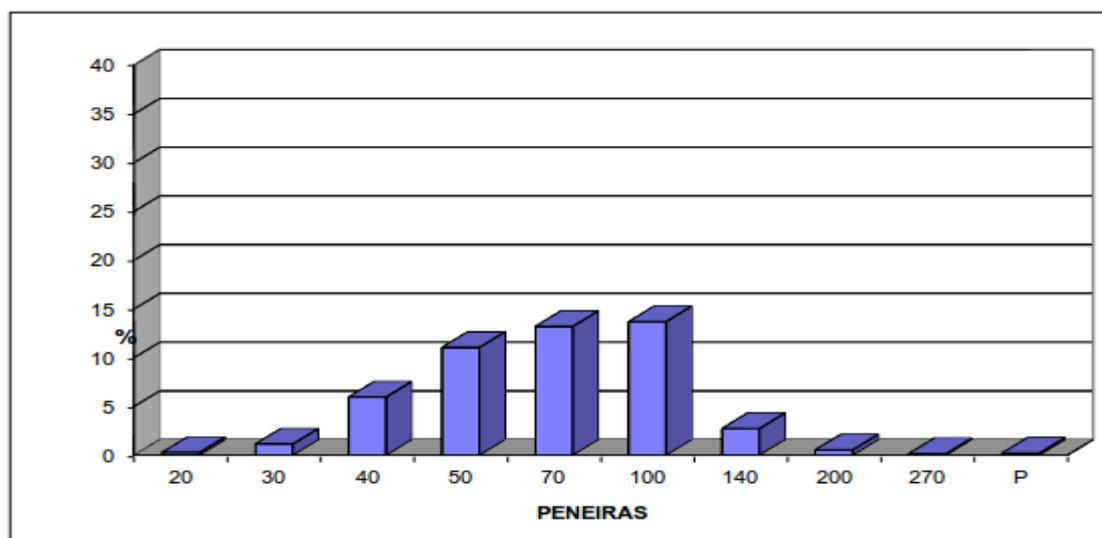
1

Rua Arthur Lopes de Oliveira, 974 - CEP - 14300-000 - Batatais - SP- contato@areiaverde.com – www.areiaverde.com

Distribuição Granulométrica

(segue gráfico granulométrico e areia retida em % de cada peneira, aonde foi calculado modulo de finura e finos)

peneira	areia retida em %
20	0,27
30	1,14
40	5,96
50	11,05
70	13,2
100	13,69
140	2,73
200	0,54
270	0,14
P	0,20



Marco Antônio Alves
Analista Químico
Especialista em Areia de moldagem a Verde
CRQ – 04452588

ANEXO C - Ficha ICSD padrão 78-1252

Card Information

Names: alpha-Silicon Oxide
Quartz low, syn
Formula: Si O₂
PDF Number: 78-1252
Quality: calculated
Subfiles: inorganic mineral alloy FIZ PHR

Cell and Symmetry Information

System: hexagonal **Space Group:** P3221 (no. 154)
a: 4.9192 **c:** 5.4050
Density (Dx): 2.642 **Z:** 3

Instrument Information

Radiation: CuKα1 **Wavelength:** 1.54060
Instrument(d): calculated **Cut Off:** 17.7
Instrument(l): calculated **I type:** peak heights
I_{cor}: 2.96

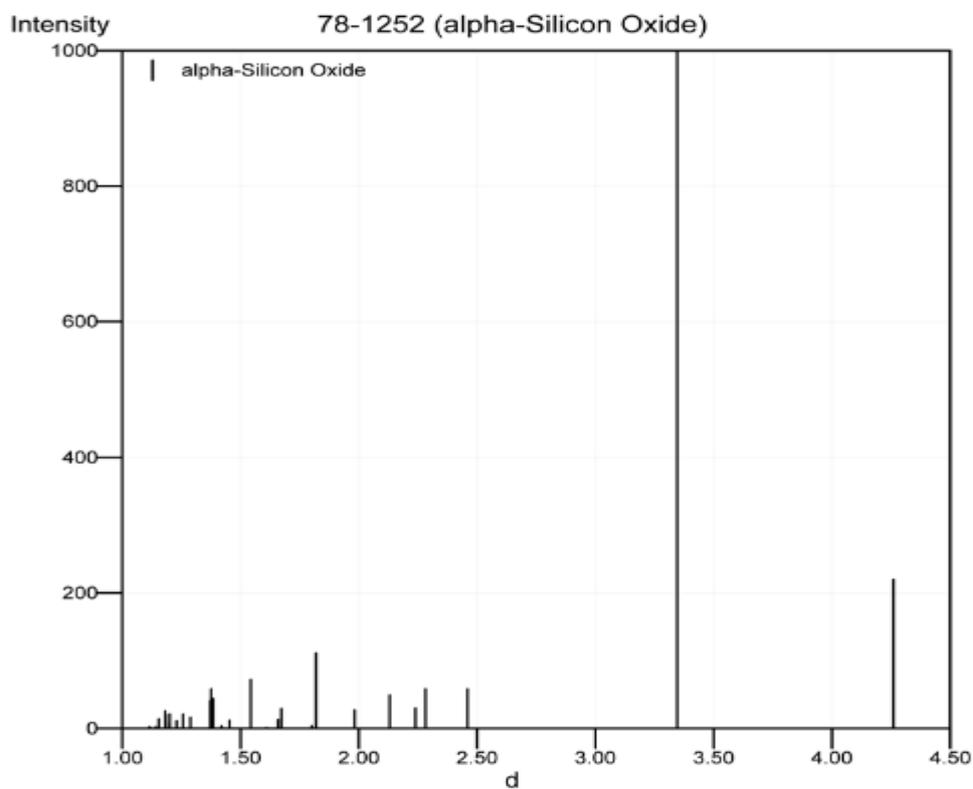
Comments and Additional Information

ICSD Number: 062404
Temperature factor: ATF
RM REM TEM 488.
RM REM PRE 1.1 kbar.
Pattern: See PDF 46-1045.
TI Structure of alpha-quartz as a function of temperature and pressure

Literature References

General: 00ICSD (1997)
Structure: Ogata, K., Takeuchi, Y., Kudoh, Y. *ZEKRDZ* **179** 403 (1987)

Peak Data



PeakList

h	k	l	d	I
1	0	0	4.2601	220
0	1	1	3.3458	999
1	1	0	2.4596	58
1	0	2	2.2821	58
1	1	-1	2.2387	30
2	0	0	2.1301	49
2	0	1	1.9817	27
1	1	-2	1.8190	111
0	0	3	1.8017	4
0	2	2	1.6729	29
0	1	3	1.6594	13
1	2	0	1.6102	1
2	1	-1	1.5432	72
1	1	-3	1.4534	12
3	0	0	1.4201	4
2	1	-2	1.3833	44
2	0	3	1.3756	58
0	3	1	1.3734	41
1	0	4	1.2880	16
3	0	2	1.2571	21
2	2	0	1.2298	11
1	2	-3	1.2006	21
2	2	-1	1.1991	8
1	1	-4	1.1843	20
1	3	0	1.1816	26
3	1	-1	1.1543	14
2	0	4	1.1410	2

2	2	-2	1.1193	1
3	0	3	1.1153	2