



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**TORREFAÇÃO DE CAVACO DE MADEIRA
PARA EMPREGO NA INDÚSTRIA
CIMENTEIRA**

Por:
Luiz Felipe Nerva Blumm

Brasília, 04 de Julho de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Luiz Felipe Nerva Blumm

TORREFAÇÃO DE CAVACO DE MADEIRA PARA EMPREGO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Projeto submetido ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 04 de Julho de 2019:

Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras
Orientador

Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha
Examinador

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Examinador

Brasília, DF
2019

Agradecimentos

Agradeço a meu orientador professor Carlos Gurgel, pela oportunidade de trabalhar em um tema de alta aplicabilidade e inovador. Aos meus estimados pais, Guilherme e Marcia Blumm, pelas incontáveis vezes em que fizeram o possível e o impossível para me moldar como sou hoje. A minha sempre presente irmã, Ana Carolina Blumm, com sua incrível motivação e confiança em mim. A minha incrível companheira, Vanessa Buzogany, que nunca me fez duvidar de minhas capacidades e desistir dos meus sonhos. Aos meus familiares e amigos pelo imenso apoio e atenção durante minha trajetória. A todo o corpo docente, discente e técnico da Universidade de Brasília com quem estive presente nesses últimos inimagináveis anos. Agradeço ao Governo Federal por me proporcionar uma experiência de universidade federal e mobilidade internacional.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

Luiz Felipe Nerva Blumm.

Resumo

O presente estudo busca caracterizar a reação de torrefação como um tratamento de cavaco de madeira, esse com o intuito de melhorar o desempenho dessa biomassa como combustível. O processo de torrefação promove melhorias no produto torreficado através da vaporização de umidade, a diminuição da higroscopicidade, o aumento de densidade energética, a diminuição da energia necessária para moagem e o aumento da resistência contra a biodegradação. Todos esses benefícios foram avaliados a partir da fabricação de um reator de torrefação que realizou ensaios variando o tempo de residência e a temperatura de torrefação. A partir dos dados coletados, o produto cavaco de madeira torreficado foi qualificado como um bom combustível alternativo na indústria cimenteira.

Palavras-chaves: Torrefação, Cavaco de Madeira, Combustível Alternativo, Produção de Cimento.

Abstract

The present study aims to characterize the torrefaction reaction as a wood chip treatment, in order to improve the performance of this biomass as a fuel. The torrefaction process promotes improvements in the torrefied product through moisture vaporization, decreased hygroscopicity, increased energy density, decreased energy required for grinding and increased resistance against biodegradation. All these benefits were evaluated from the manufacture of a torrefaction reactor that performed tests varying the residence time and the torrefaction temperature. From the data collected, the torrefied wood chip was qualified as a good alternative fuel for the cement industry.

Key-words: Torrefaction, Wood Chip, Alternative Fuel, Cement Production.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Etapas de produção do cimento (Acervo digital interno da Votorantim Cimentos, 2018)	14
Figura 2 – Torre de pré-aquecimento, Forno rotativo e Resfriador para a fabricação de cimento. Adaptado de Stadler, Poland e Gallestey (2011)	15
Figura 3 – Esquema do processo de fabricação do Clínquer. Adaptado de Mujumdar et al. (2007)	16
Figura 4 – Balanco típico de massa e energia do processo de torrefação. Símbolos: E=Unidade de Energia, M=Unidade de Massa (BERGMAN et al., 2005)	20
Figura 5 – Principais fenômenos físico-químicos que ocorrem durante a torrefação. Adaptado de Bergman et al. (2005)	21
Figura 6 – Curvas termogravimétricas dos compostos poliméricos Hemicelulose, Celulose e Lignina. Adaptado de Basu (2013)	22
Figura 7 – Caminho típico das partículas de biomassa pelo processo de torrefação Adaptado de Gent et al. (2017)	23
Figura 8 – Efeito do pré-tratamento na estrutura da celular da biomassa Adaptado de Tumuluru et al. (2011)	25
Figura 9 – Relação dos tipos de reatores de torrefação Adaptado de Gent et al. (2017)	26
Figura 10 – Esquema simplificado de um reator de torrefação em lotes	27
Figura 11 – Resistência elétrica cartucho com fixação por flange retirado de Gomes (2011)	29
Figura 12 – Visualização do display LCD	31
Figura 13 – Amostras fabricadas	32
Figura 14 – Analizador de Umidade Infravermelho	33
Figura 15 – Equipamentos da Moagem	34
Figura 16 – Balança de precisão com amostra.	35
Figura 17 – Equipamento de determinação de PCI.	35
Figura 18 – Mufla para determinação do teor de cinzas.	36
Figura 19 – Foto da nova tampa do reator	37
Figura 20 – Montagem do controlador de temperatura	38
Figura 21 – Gráfico da curva de aquecimento do e resfriamento do ensaio preliminar	39
Figura 22 – Percentuais de umidade de acordo com os padrões de processamento	40

Figura 23 – Mudanças físicoquímicas ocorridas durante a torrefação de biomassas lignocelulósicas. Adaptado de Gent et al. (2017)	41
Figura 24 – Variação do PCI por estágios de temperatura de torrefação . .	41
Figura 25 – Diferença entre combustíveis torrificados e não torrificados . .	42
Figura 26 – Evidência de que gases de torrefação pode ser um gás combustível	43
Figura 27 – Comparação da biomassa após o processo de moagem	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados de consumo de calor de unidades da Votorantim Cimentos	17
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de selecionados tipos de reatores de torrefação	28
Tabela 3 – Planejamento de amostras	32
Tabela 4 – Teor de umidade, PCI, massa e percentual de cinzas obtidos obtidos por diferentes tempos e temperaturas por meio dos testes laboratoriais	39
Tabela 5 – Cronograma de atividades propostas para este estudo	46

Lista de abreviaturas e siglas

BT	<i>Biomassa Torrificada</i>
CP	<i>Cimento Portland</i>
VC	<i>Votorantim Cimentos</i>
PCI	<i>Poder Calorífico Inferior</i>
EPI	<i>Equipamento de Proteção Individual</i>
TRea	<i>Temperatura de Reação</i>
TRed	<i>Tempo de Residência</i>

Lista de símbolos

Q_{ps}	Calor necessário para a pré-secagem
m_i	Massa da biomassa crua
c_{bu}	Calor específico da biomassa recebida
T_0	Temperatura inicial do sistema
h_{ups}	Fator de eficiência de Utilização do Calor
Q_s	Calor necessário para a secagem
L	Calor latente de vaporização da água
u_f	Fração de umidade da biomassa recebida
Q_{psq}	Calor necessário para a pós-secagem
c_{ps}	Calor específico da biomassa seca
T_t	Temperatura de torrefação
h_{upsq}	Fator de eficiência de utilização de calor
Q_{torr}	Calor necessário para a torrefação
Q_{perd}	Calor perdido para o ambiente
X_t	Parâmetro que descreve a quantidade de calor absorvido durante a torrefação
Q_{resf}	Calor retirado no processo de resfriamento
PM_{bs}	Perda de massa devido a torrefação na base seca
c_{pt}	Calor específico da biomassa torrificada
T_p	Temperatura de saída do estado de resfriamento

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	12
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	FABRICAÇÃO DO CIMENTO	14
2.1.1	Mineração e Pré-Homogeneização	14
2.1.2	Moagem de Farinha ou de Cru	15
2.1.3	Produção do Clínquer	15
2.1.3.1	Torre de Pré-Aquecimento	16
2.1.3.2	Forno de Clínquer	16
2.1.4	Resfriamento	17
2.1.5	Moagem de Cimento	17
2.1.6	Expedição de Cimento	18
2.1.7	Coprocessamento	18
2.2	PROCESSOS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICOS	18
2.2.1	Combustão	18
2.2.2	Pirólise	19
2.2.3	Gaseificação	19
2.2.4	Liquefação	19
2.2.5	Torrefação	19
2.2.5.1	Mecanismos de Decomposição de Torrefação	20
2.2.5.2	Estágios do Processo de Torrefação	21
2.2.5.2.1	Aquecimento Inicial	21
2.2.5.2.2	Pré-secagem	21
2.2.5.2.3	Pós-secagem e Aquecimento Médio	22
2.2.5.2.4	Torrefação	22
2.2.5.2.5	Resfriamento	22
2.2.5.3	Balanço de Massa	22
2.2.5.4	Comportamento de Degradação Térmica	23
2.2.5.5	Propriedades da Biomassa Torrificada	25
2.2.5.5.1	Moagem	25
2.2.5.5.2	Conteúdo Energético	26
2.2.5.6	Tipos de Reatores de Torrefação	26
2.2.5.6.1	Reatores de Sistema em Lotes	27

2.2.5.6.2	Reatores de Fluxo Contínuo	27
3	MEIOS E MÉTODOS	29
3.1	CONCEPÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	29
3.1.1	Reator de Torrefação	29
3.1.1.1	Concepção da Nova Tampa do Reator	29
3.1.1.2	Controle de Temperatura	30
3.1.1.3	Configuração do Controlador Arduino	30
3.2	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO LEITO	31
3.3	INSTRUMENTAÇÃO E EQUIPAMENTOS	31
3.4	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	32
3.5	ANÁLISES DAS AMOSTRAS	33
3.5.1	Determinação do Teor de Umidade	33
3.5.2	Determinação do Poder Calorífico Inferior, PCI	33
3.5.2.1	Moagem do Material	34
3.5.2.2	Dosagem na balança de precisão	34
3.5.2.3	Determinação do PCI	34
3.5.3	Determinação do Teor de Cinzas	35
3.5.4	Análise dos Dados Coletados	36
4	RESULTADOS	37
4.1	NOVO REATOR DE TORREFAÇÃO	37
4.1.1	Controlador de Temperatura	37
4.1.1.1	Curva de Aquecimento do Reator	38
4.1.2	Resultados das Amostras	39
4.1.2.1	Teor de Umidade	39
4.1.2.2	Poder Calorífico Inferior	40
4.1.2.3	Teor de Cinzas	41
4.1.2.4	Moagem	42
4.1.2.5	Potencial Como Combustível Alternativo	43
5	CONCLUSÃO	45
5.1	Viabilidade de Emprego na Indústria Cimenteira	45
5.2	Futuros Estudos	46
5.3	Execução do Cronograma de atividades	46
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS DO REATOR	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

As fontes de combustíveis fósseis são finitas e o seu uso danifica cada vez mais a atmosfera terrestre, por meio de emissões gasosas que contribuem para o aquecimento global. Todavia, a matriz energética mundial ainda é muito dependente desses tipos de combustíveis. Ao mesmo tempo, existe um grande esforço para o desenvolvimento de novos processos de produção e adequação de novas fontes energéticas renováveis. Um exemplo desse tipo de fonte energética é a biomassa vegetal, que se mostra como a única fonte sustentável de carbono orgânico disponível (GOMES, 2011) e tem grande potencial para desenvolvimento de novas tecnologias e de novas aplicações na indústria.

A biomassa vegetal pode ser queimada diretamente, gerando energia térmica, ou, por meio de processos de conversão específicos, pode ser transformada em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos (GOMES, 2011). Um desses processos de conversão é a torrefação, processo de aquecimento da biomassa a uma temperatura entre 200°C e 300°C em uma atmosfera pobre em oxigênio.

A biomassa torrificada (BT) traz vantagens importantes por ultrapassar as limitações tradicionais da biomassa ao manter o balanço de CO₂ neutro. Baixo custo devido a densidade energética aumentada e resistência a umidade, grande acesso a fontes de substrato, baixo nível de biodegradação quando armazenada, baixa energia para moagem, boa adequação à necessidade do cliente e pequeno impacto de emissão de CO₂ durante o processo são vantagens listadas por Wild (2016) para a biomassa torrificada.

A indústria cimenteira representa cerca de 12 a 15% do consumo total de energia em alguns países e, dentro desse contexto, 50 a 60% do custo total da fabricação são oriundos, justamente, do gasto energético. Ainda nesse cenário, a parcela de energia térmica nesse custo é de 20 a 25% (MADLOOL et al., 2011). Ao mesmo tempo, no panorama brasileiro, o principal combustível utilizado nessa indústria é o coque de petróleo, adquirido principalmente no sul do país e importado de outros países. Com isso, a indústria cimenteira vem procurando meios alternativos para diminuir a emissão de gases poluentes e melhorar a renda através do emprego de combustíveis alternativos.

O emprego de combustíveis alternativos na produção do cimento pode ser alavancado. A adequação de novas tecnologias na linha de fabricação e o tratamento da biomassa são formas de aumentar essa utilização. Com isso, é possível investigar a aplicabilidade do tratamento da biomassa torrificada como combustível na indústria cimenteira.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos desse trabalho consistem na avaliação do produto da torrefação de cavaco de madeira, cavaco de madeira torreficado, como combustível alternativo no processo de fabricação de cimento. Portanto, listam-se os seguintes objetivos:

- Fabricar o reator de torrefação
- Verificar o funcionamento do reator
- Caracterizar o cavaco de madeira torreficado como possível combustível

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FABRICAÇÃO DO CIMENTO

Nesse trabalho foi realizado o estudo da caracterização do cavaco de madeira após o processo de torrefação na fabricação de Cimento Portland (CP), o qual é dividido em 11 categorias. Independente da caracterização dos diversos tipos desse cimento, o produto em comum é o Clínquer, obtido após a etapa de clínquerização, abordada na seção 2.1.3.

A linha de produção do CP é conhecida mundialmente, com os processos iguais independente da região de fabricação. Dessa forma, pode-se observar na figura 1 as diversas etapas relacionadas à produção desse tipo de cimento.



Figura 1 – **Etapas de produção do cimento** (Acervo digital interno da Votorantim Cimentos, 2018)

2.1.1 Mineração e Pré-Homogeneização

As etapas de mineração e pré-homogeneização são, na maioria das vezes, determinantes na localização geográfica das plantas. Através da atividade extrativista, obtém-se matérias primas necessárias para fabricação de cimento, como o calcário. Esse material é constituído basicamente de carbonato de cálcio CaCO_3 , mas apresenta impurezas que geram o aproveitamento de cerca de 56% do material extraído (LIMA, 2011)

Outra matéria prima retirada na área da mineração é a argila, a qual é composta de silicatos de alumínio hidratados, de óxidos de ferro, de alumínio e de silício, substâncias essenciais para a fabricação do cimento (LIMA, 2011).

Já a pré-homogeneização é utilizada para minimizar os efeitos da composição química do material retirado na área de mineração. Nessa fase, o material é estocado em camadas, o que possibilita a mistura na extração para alimentação da nova etapa do processo: a moagem de farinha ou também chamada de moagem de cru (LIMA, 2011).

2.1.2 Moagem de Farinha ou de Cru

Na etapa de moagem de farinha, ou de moagem de cru, a mistura de calcário, de argila e de outras matérias primas entra em um moinho de bolas, horizontal, ou moinho de rolos, vertical, para passar por um processo de moagem fina da qual pode-se obter tamanhos de grãos por volta de $50\ \mu\text{m}$. Após esse processo, o material obtido é chamado de farinha crua, por isso o nome da etapa de moagem de cru. Assim, a farinha é armazenada em um silo antes de entrar na linha de produção do clínquer, componente base do cimento.

2.1.3 Produção do Clínquer

A fabricação do clínquer pode ser dividida em duas macro etapas: torre de ciclones ou torre de pré-aquecimento e forno rotativo.

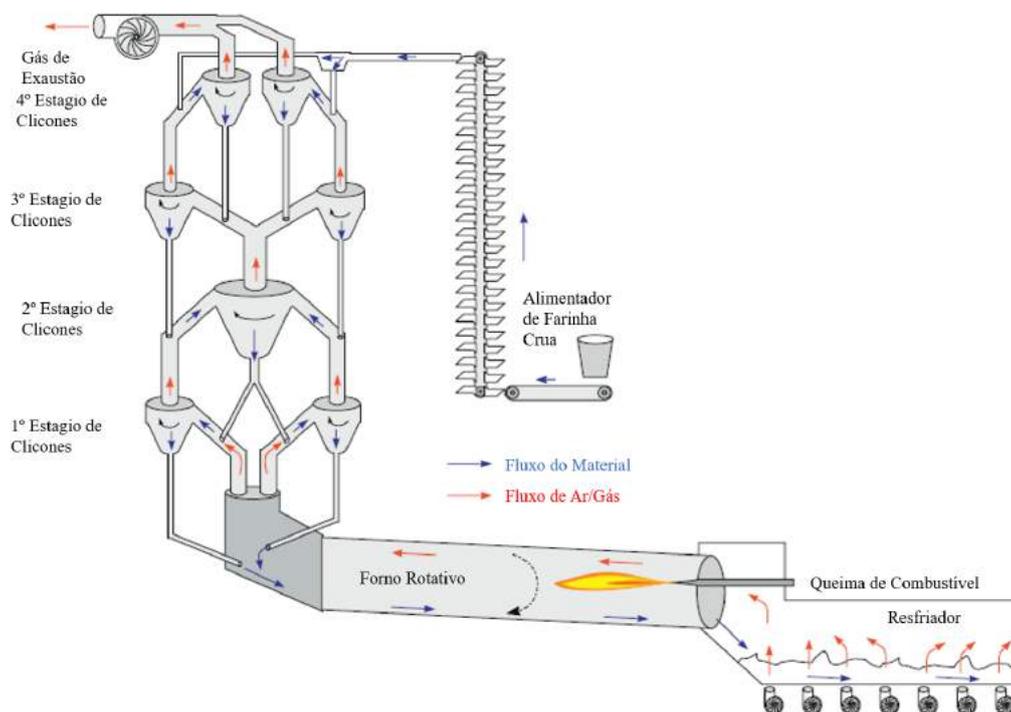


Figura 2 – Torre de pré-aquecimento, Forno rotativo e Resfriador para a fabricação de cimento. Adaptado de Stadler, Poland e Gallestey (2011)

2.1.3.1 Torre de Pré-Aquecimento

A torre de pré-aquecimento ou de ciclones possui esse nome pelas características construtivas do equipamento desse processo. Após a armazenagem no silo, um elevador transporta o material até o topo desta torre. A farinha entra em um fluxo que, dependendo do modelo da torre e do forno, pode possuir vários estágios que geram vórtices descendentes contrapondo-se ao fluxo do ar em alta temperatura, que vem do resfriador explicado na seção 2.1.4. Nesta etapa do processo, o material já passa a perder massa devido a reação de calcinação e da consequente liberação de CO_2 . Para cada 1600 kg de material alimentado no topo da torre, apenas 1000kg chegam ao seu fundo (LIMA, 2011). Justamente ao final do pré-aquecimento, há a ação de um equipamento chamado de calcinador, como visto na figura 3. Nesse estágio, parte do material já começa a passar pelo processo de calcinação, que é endotérmico, necessitando então de injeção de calor via queima de combustível adequado (MUJUMDAR et al., 2007). Em muitos casos, o combustível utilizado por ser carvão ou coque de petróleo, este último um produto da refinaria de petróleo. Na seção 2.1.7 percebe-se como a indústria cimenteira atua na substituição desses combustíveis.

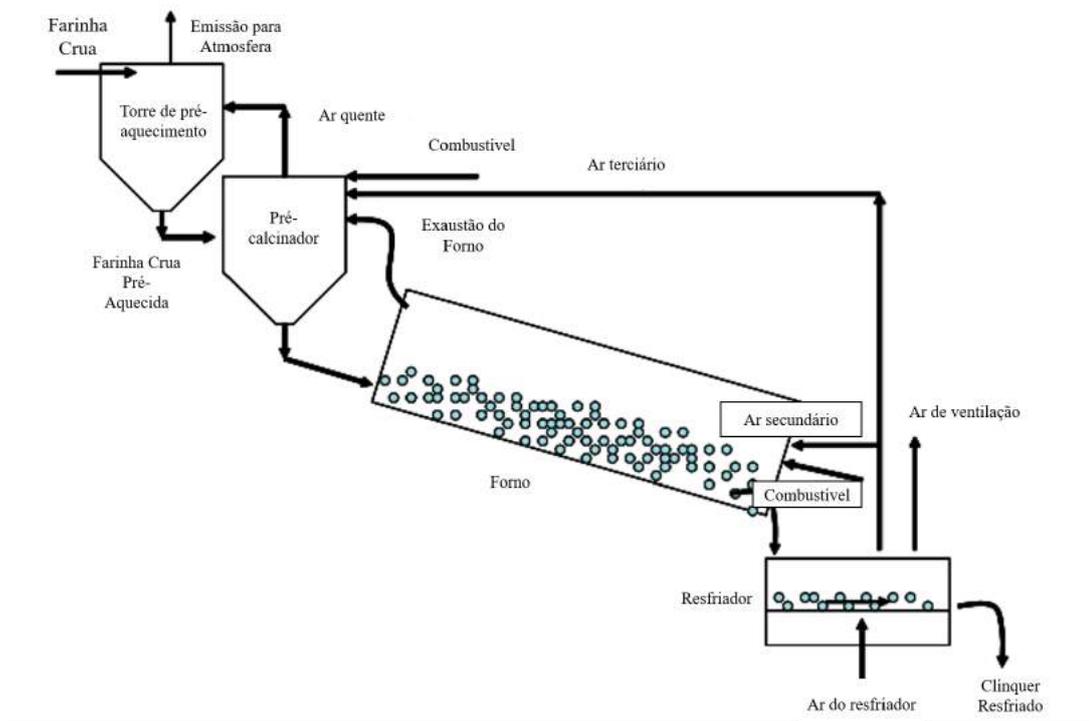


Figura 3 – Esquema do processo de fabricação do Clínquer. Adaptado de Mujumdar et al. (2007)

2.1.3.2 Forno de Clínquer

Fornos de clínquer são cilindros horizontais de até 160 metros de comprimento, um leve ângulo de inclinação e rotação que pode variar entre 0,5 a 4,0 rpm (LIMA,

2011). Após passar pelo calcinador, o material já se encontra em uma temperatura alta que comporta-se como um líquido incandescente. No forno de clínquer, esse material é aquecido até 1250°C, temperatura necessária para a formação do clínquer.

Para alcançar temperaturas de chama de 2000°C, é necessário um alto consumo de combustível. Dados fornecidos pela Votorantim Cimentos mostram um consumo térmico de cerca de 890 kCal por quilograma de cimento produzido, como visto na tabela 1. Essa energia térmica é admitida através do queimador principal localizado ao final do forno. Os combustíveis principais, carvão e coque de petróleo, são pulverizados junto com o ar primário do maçarico. É nesse queimador que ocorre o gasto de até 40% de todo o consumo térmico de uma planta. Por isso, existe uma grande busca por formas economicamente viáveis de realizar uma substituição térmica nessa etapa.

Tabela 1 – Dados de consumo de calor de unidades da Votorantim Cimentos

Fábrica	A	B	C	D	E	F	Média
Consumo de Calor (kcal/kg)	860	912	997	875	844	847	889

2.1.4 Resfriamento

O resfriamento do clínquer se dá logo após formação do produto. Após passar pelo forno, o material se encontra em temperaturas muito altas para trabalhar e para transportar com segurança, então esse calor é reaproveitado no processo. No resfriador, o clínquer é despejado em uma grelha, onde há o funcionamento de ventiladores que forcem o ar a troca calor com o recém formado clínquer. Esse ar, então, possui três vias: secundário, terciário e de rejeito.

O ar secundário é a corrente de ar que entra no forno pela mesma passagem que o clínquer saiu. Este ar ajuda no consumo térmico do queimador principal, uma vez que não precisa realizar todo o aquecimento do material descendente sozinho.

O ar terciário é a porção do ar canalizado em um duto que faz a sua admissão diretamente no calcinador, ajudando o material no final da torre de aquecimento a iniciar o processo de calcinação.

O ar de rejeito é simplesmente o ar sem temperatura suficiente para contribuir nas outras vias e possui alto conteúdo de material particulado, seguindo então o caminho por um filtro de mangas e liberado na atmosfera.

2.1.5 Moagem de Cimento

Com o clínquer formado e estocado, a próxima etapa é a moagem de cimento, na qual o produto final é gerado. Os equipamentos desse processo podem ser os moinhos

de bolas ou os moinhos rolos. Nessa etapa, são misturados clínquer, gesso, pozolana, escória e outros aditivos que vão determinar o tempo de cura do concreto bem como suas propriedades mecânicas ao fim do processo. Após passar pela etapa de moagem, o cimento é estocado em silos de cimento até ser ensacado ou despejado a granel.

2.1.6 Expedição de Cimento

A expedição de cimento é a última etapa do processo de produção, na qual, após armazenado em grandes silos, o cimento passa a ser ensacado e paletizado ou despejado em meios de transporte, como caminhões, navios ou trens.

2.1.7 Coprocessamento

Uma das áreas da fabricação de cimento que tido extrema relevância nos últimos anos é o coprocessamento. Esse processo consiste na substituição de combustíveis tradicionais fósseis por combustíveis alternativos, entre eles o cavaco de madeira, a casca de arroz e os pneus inservíveis, picados ou inteiros.

Atualmente, existem fábricas no Brasil que superam 40% de substituição térmica em um ano completo de atividade. Essa substituição só acontece na etapa de pré-aquecimento da fabricação de clínquer, devido a características construtivas do processo e o estado desses combustíveis que entram na linha de produção. Todos os combustíveis alternativos citados são introduzidos diretamente no leito do material, onde liberam energia através da sua queima pelo contato com a farinha aquecida já em alta temperatura. No futuro, é esperado a substituição do combustível fóssil empregado no queimador principal, o qual possui limitações tanto quanto no tamanho das partículas e como também na umidade do combustível.

2.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICOS

Processos de conversão termoquímicos de biomassa tem como objetivo transformar as fontes de resíduos biológicos disponíveis em combustíveis utilizáveis para a geração de energia na forma de calor. Dentre os processos, é possível citar alguns desses tipos de conversão como a combustão, a pirólise, a gaseificação, a liquefação e a torrefação.

2.2.1 Combustão

A combustão é um dos meios de conversão termoquímica mais antigos. Esse processo é estudado e aprimorado desde a própria descoberta do fogo. Trata-se de uma reação exotérmica entre oxigênio e hidrogênio presentes no ar atmosférico e na biomassa. A com-

bustão estequiométrica produz moléculas de CO₂ e H₂O (BASU, 2013). O principal uso da combustão é para a liberação direta de energia na forma de calor.

2.2.2 Pirólise

A pirólise é um processo de conversão termoquímica que acontece em um ambiente com ausência de oxigênio. Portanto, trata-se de uma degradação térmica da estrutura da biomassa. Com isso, retira-se três tipos de produtos, gases, líquidos e sólidos. As temperaturas da pirólise variam de 350 - 550°C e vão até 700°C (GOYAL; SEAL; Saxena, 2008).

2.2.3 Gaseificação

A gaseificação transforma a biomassa em gás combustível, e outros compostos químicos gasosos, a partir da oxidação parcial do composto biológico sob altas temperaturas (GOYAL; SEAL; Saxena, 2008). Esse processo ocorre entre temperaturas de 800-900°C. No Brasil, a gaseificação tem como principal objetivo, a geração de metano e amônia (BARROS; BORGES, 2017).

2.2.4 Liquefação

A liquefação é uma conversão que transforma biomassa em um combustível oleoso através de um processo hidrotérmico com temperaturas elevadas, 300-350°C e a pressões entre 12 a 20 MPa, entrando em contato com água. Esse processo produz um combustível líquido. A liquefação pode ser obtida através da pirólise ou gaseificação também (BASU, 2013).

2.2.5 Torrefação

A torrefação, ou também "meia pirólise", é uma tecnologia de conversão termoquímica recentemente utilizada no campo de combustíveis renováveis. Ela consiste no aquecimento lento até temperaturas relativamente baixas, cerca de 200°C a 300°C, em uma atmosfera com oxigênio limitado. Nessas condições, reações físicas e químicas geram um produto mais hidrofóbico, homogêneo e com maior densidade energética. Comumente, esse processo leva a uma perda de massa de 20% a 30% e perda de energia de cerca de 10% a 20%. Isso porque a torrefação aplica baixas taxas de aquecimento, que carrega somente os voláteis de baixa densidade energética e umidade do material, evitando reações de carbonização (GENT et al., 2017)(STELT et al., 2011). A figura 4 mostra um típico balanço de massa e energia desse processo.

Essa conversão termoquímica é interessante por diversos motivos. Primeiro, há uma diminuição da higroscopicidade por conta da redução na capacidade de absorver

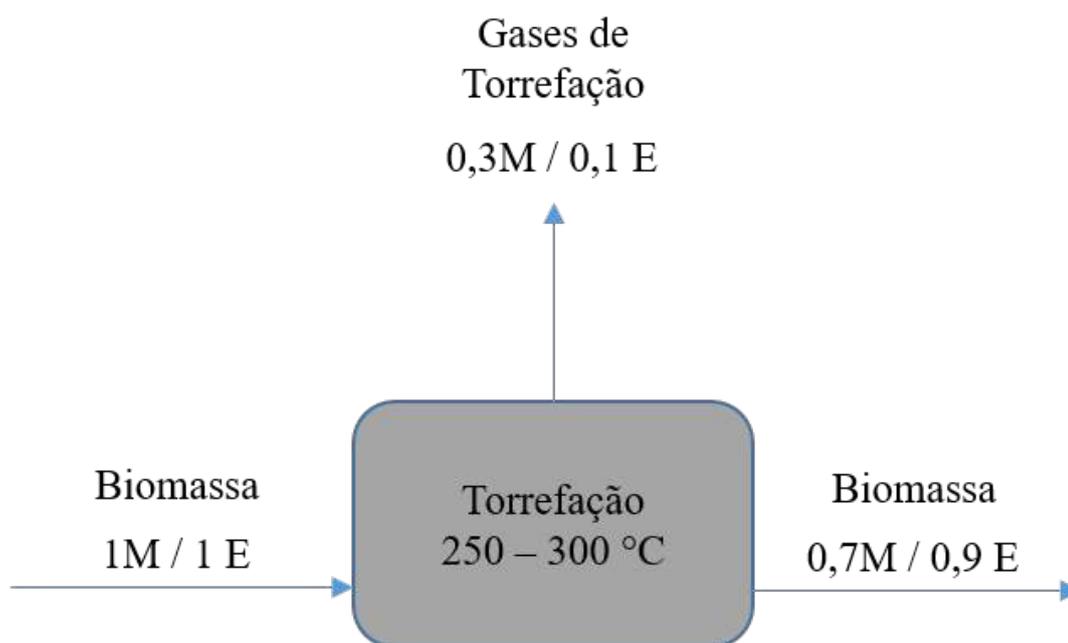


Figura 4 – **Balanço típico de massa e energia do processo de torrefação.** Símbolos: E=Unidade de Energia, M=Unidade de Massa (BERGMAN et al., 2005)

umidade, o que resulta na maior resistência à decomposição biológica e, então, possibilita o armazenamento desse combustível por longos períodos sem que haja perdas significativas por degradação. Segundo, o uso de temperaturas relativamente baixas quando comparada com outros processos de conversão termoquímica. Terceiro, a torrefação pode ser obtida por processos mais simples, o que abre portas para equipamentos e materiais de custo mais acessível (GENT et al., 2017). Finalmente, esse processo gera um produto mais fácil de moer com uma redução de 70% a 90% de energia necessária para moagem, comparada à biomassa não tratada (SHANG et al., 2014).

2.2.5.1 Mecanismos de Decomposição de Torrefação

Biomassas de origem vegetal possuem três estruturas poliméricas principais: celulose, hemicelulose e lignina. Durante a torrefação, cada uma dessas estruturas é degradada em diferentes temperaturas, como demonstrado na figura 5.(BERGMAN et al., 2005). Percebe-se que, entre as temperaturas de 100 °C a 150 °C, ainda não existe degradação dos compostos lignocelulósicos. A partir de 150 °C, a hemicelulose começa seu processo de degradação até a sua carbonização total por volta dos 250 °C. Já a lignina passa por um período de amolecimento e transição vítrea até o patamar de 150 °C, quando começa sua degradação, a qual irá terminar nas temperaturas próximas a 300°C. A celulose, por sua vez, começa seu processo de degradação durante o processo de torrefação, quando a temperatura está acima de 200 °C. Sua degradação é completa somente quando atinge temperaturas superiores a 300 °C ao descaracterizar-se o processo de torrefação e começar

o processo de carbonização.

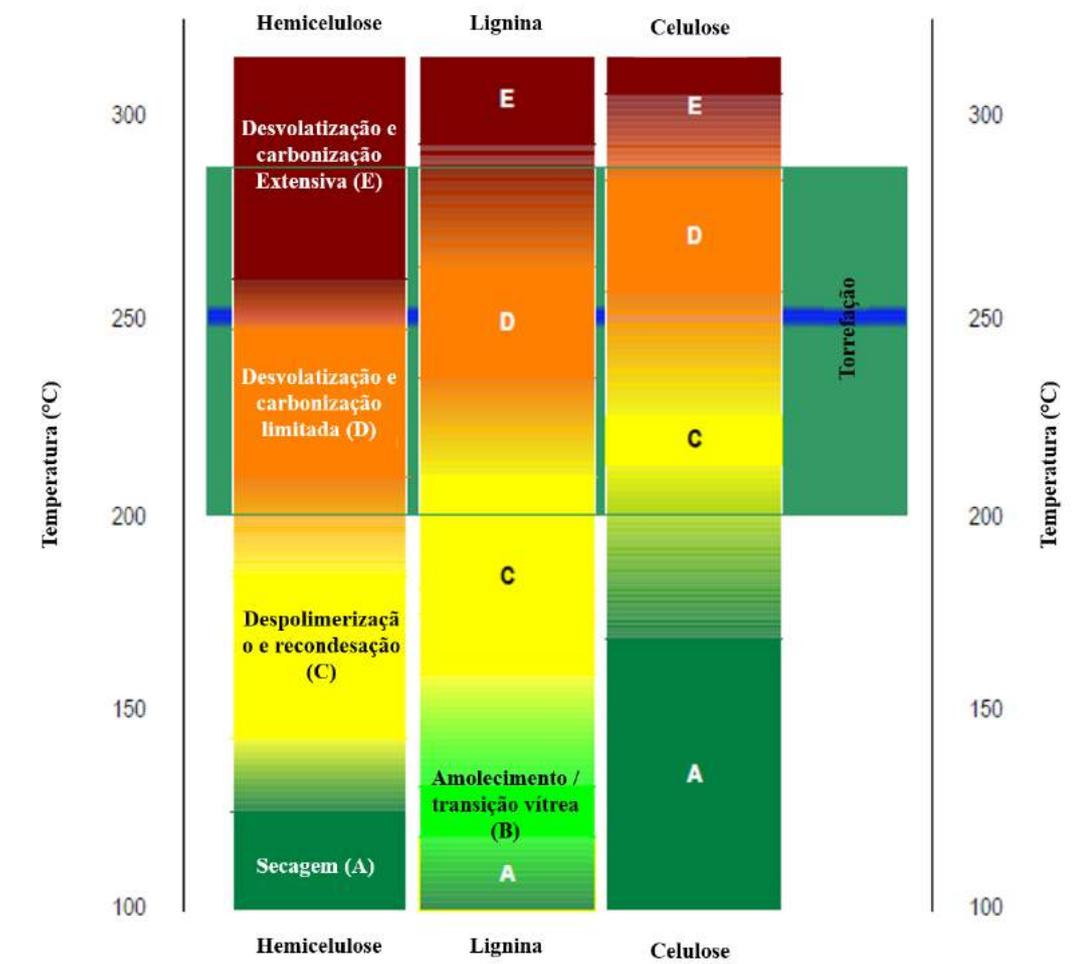


Figura 5 – Principais fenômenos físico-químicos que ocorrem durante a torrefação. Adaptado de Bergman et al. (2005)

2.2.5.2 Estágios do Processo de Torrefação

O processo geral de torrefação pode ser dividido em algumas etapas, como o aquecimento inicial, a secagem, a torrefação e o resfriamento. Os cinco principais estágios de torrefação completa podem ser definidos segundo Stelt et al. (2011).

2.2.5.2.1 Aquecimento Inicial

Estágio no qual a temperatura é aumentada até 100°C e o processo de evaporação da umidade é iniciado.

2.2.5.2.2 Pré-secagem

A temperatura de 100°C atingida, momento no qual a umidade livre evapora em temperatura constante.

2.2.5.2.3 Pós-secagem e Aquecimento Médio

A biomassa atinge a temperatura de 200°C e mais umidade é perdida, enquanto ainda existe a resistência à transferência de calor. Nesse estágio, pode existir perda de massa, devido à pequenas frações de voláteis de baixa densidade que evaporam.

2.2.5.2.4 Torrefação

O processo de torrefação da biomassa começa assim que ultrapassa 200°C até que seja resfriada abaixo dessa temperatura. É nesse estágio que existe a maior perda de massa, devido a degradação das estruturas poliméricas vegetais.

2.2.5.2.5 Resfriamento

Diminuição da temperatura dos 200°C até a temperatura de manuseio do produto torreficado.

2.2.5.3 Balanço de Massa

Durante o processo de torrefação, o material submetido à reação passa por uma perda de massa. Esse fenômeno ocorre principalmente devido à perda de umidade e voláteis (ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010).

A curva termogravimétrica geral de um composto orgânico vegetal pode ser vista na figura 6. É notável que na faixa de temperatura de operação da torrefação exista, majoritariamente, na zona de degradação de hemicelulose, entre 200 °C 300°C.

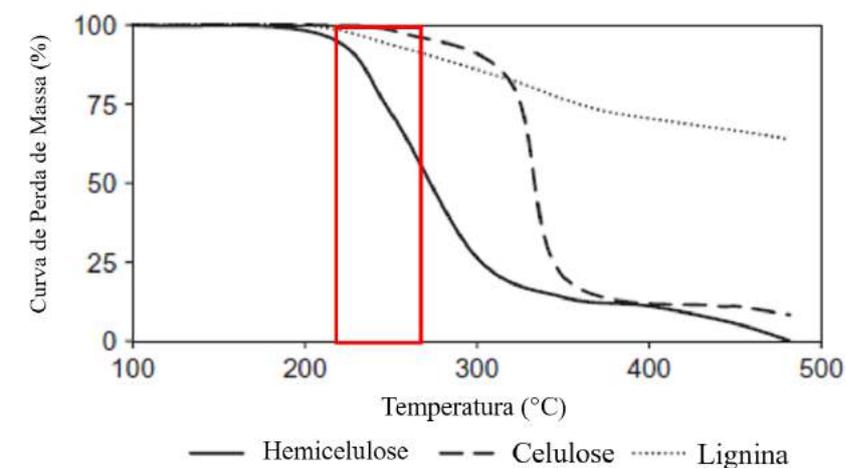


Figura 6 – Curvas termogravimétricas dos compostos poliméricos Hemicelulose, Celulose e Lignina. Adaptado de Basu (2013)

2.2.5.4 Comportamento de Degradação Térmica

Como visto na seção 2.2.5.2, a torrefação pode ser dividida por estágios. Bergman et al. (2005) e Basu (2013) definiram e quantificaram o calor transferido durante essa reação, como apresentado na figura 7.

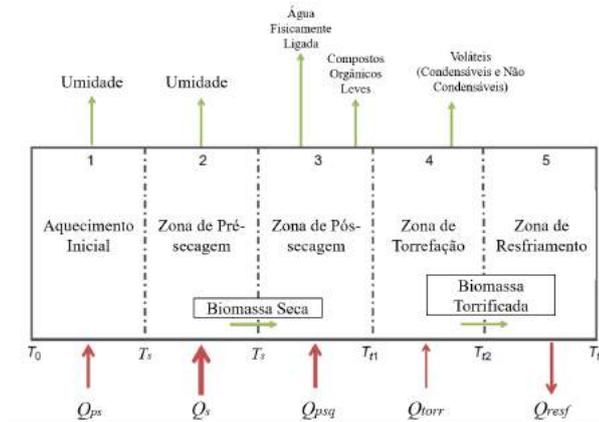


Figura 7 – Caminho típico das partículas de biomassa pelo processo de torrefação Adaptado de Gent et al. (2017)

Sendo assim, pode-se formular as quantidades de energias necessárias para a reação de torrefação pelas seguintes formulações retiradas de Gent et al. (2017). No primeiro estágio, Q_{ps} corresponde ao calor necessário na fase de pré-secagem.

$$Q_{ps} = \frac{m_i c_{bu} (100 - T_0)}{h_{ups}} \quad (1)$$

Onde m_i (kg) é a massa da biomassa "crua", c_{bu} (J/kg°C) é o calor específico da biomassa recebida, T_0 (°C) é temperatura inicial do sistema, e h_{ups} é o fator de eficiência de utilização do calor.

Enquanto o calor de pré-aquecimento é relativamente pequeno, comparado ao processo completo, o calor necessário para o estágio de secagem é o mais intenso energeticamente. Ele pode ser escrito:

$$Q_s = \frac{LU_f m_i}{h_{us}} \quad (2)$$

Onde, L (kJ/kg) é o calor latente de vaporização da água sob pressão da reação, U_f é a fração de umidade da biomassa recebida.

Com a biomassa seca, a temperatura aumenta lentamente até o patamar necessário para a torrefação, entre 200 °C e 300 °C. Após a secagem completa, o CO₂ começa a ser emitido. Durante a secagem reativa, na qual as moléculas de água confinadas na estrutura do material são liberadas, ocorrem mudanças na estrutura que não podem ser revertidas com a adição de água. Isso acontece por causa da quebra das ligações entre os átomos de

carbono e de hidrogênio e da despolimerização da hemicelulose (GENT et al., 2017). Esse processo requer uma pequena fração de calor, comparada ao total, e pode ser escrita na equação 3.

$$Q_{psq} = \frac{m_i(1 - U_f) * c_{ps}(T_t - 100)}{h_{upsq}} \quad (3)$$

Onde, c_{ps} (J/kg) é o calor específico da biomassa seca, T_t (°C) é a temperatura de torrefação, e h_{upsq} é o fator de eficiência de utilização de calor.

A partir do momento que a biomassa atinge a região dos 200°C, a reação de torrefação começa e se dá em dois regimes. O primeiro fica entre os 200-250°C, quando ocorre uma desvolatilização limitada e a carbonização da hemicelulose. A maioria das ligações inter e intramoleculares de hidrogênio, carbono-carbono (C-C) e carbono-oxigênio (C-O) são quebradas, resultando no desprendimento de líquidos condensáveis e de gases não condensáveis (TUMULURU et al., 2011). Entre os 250-300°C acontece o segundo regime, caracterizado pela decomposição extensiva da hemicelulose e desvolatilização limitada da celulose e da lignina. Nessas temperaturas, a estrutura celular é destruída completamente, formando um sólido quebradiço e não fibroso, além da quebra de grupos de hidroxilas (-OH) aumentarem a hidrofobicidade da biomassa (GENT et al., 2017). O calor necessário nessa etapa é formulado pela equação 4.

$$Q_{torr} = Q_{perd} + m_i(1 - U_f)X_t \quad (4)$$

Onde Q_{perd} (kJ) é o calor perdido para o ambiente e X_t (kJ/kg) é um parâmetro que descreve a quantidade de calor absorvido durante a torrefação.

No geral, a torrefação é suavemente exotérmica, assim sendo, a quantidade de energia necessária para esse estágio é relativamente pequena comparada ao total de energia injetada no processo (PRINS, 2005). O grau de torrefação depende da temperatura de reação e do tempo de residência do material no reator. Após completar a torrefação, o produto é resfriado à temperatura ambiente para que não ocorra combustão espontânea. Esse é um passo essencial para o processo como um todo, porque a biomassa eleva sua reatividade na presença de oxigênio (BERGMAN et al., 2005). A energia retirada durante o processo de resfriamento, Q_{resf} , pode ser escrita na equação 5.

$$Q_{resf} = m_i(1 - U_f)PM_{bs}c_{pt}(T_t - T_p) \quad (5)$$

Onde, PM_{bs} (kg) é a perda de massa devido a torrefação na base seca, c_{pt} (J/kg°C) é o calor específico da biomassa torrificada e T_p (°C) é a temperatura de saída do estado de resfriamento.

2.2.5.5 Propriedades da Biomassa Torrificada

Algumas características da biomassa a impossibilita de ser mais utilizada como combustível, como o alto teor de umidade, o que impacta tanto no ganho de energia quanto nos custos de transporte e armazenamento (MEDIC, 2012). Com isso, pode-se determinar a torrefação como um processo de pré-tratamento da biomassa para aumentar seus ganhos como combustível alternativo.

2.2.5.5.1 Moagem

A celulose é responsável pela rigidez estrutural de biomassa vegetal, enquanto a lignina forma conexões entre a estrutura de fibras de celulose. Esses polímeros dificultam o armazenamento e o processamento desse material. Assim, durante o processo de torrefação, a celulose é despolimerizada e a hemicelulose é quebrada, o que resulta em uma estrutura quebradiça e parecida com carvão (BERGMAN et al., 2005). Por conta dessas reações, a energia necessária para moagem reduz cerca de 10-30% comparada a biomassa não tratada. É possível ver os efeitos na estrutura da biomassa após o processo de torrefação na figura 8.

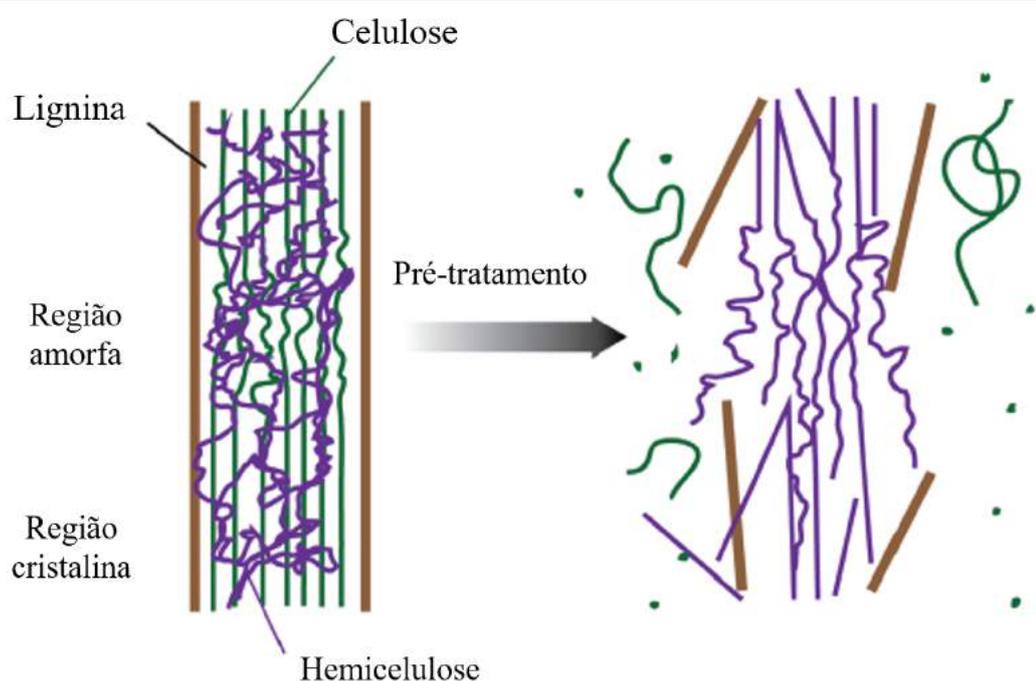


Figura 8 – Efeito do pré-tratamento na estrutura da celular da biomassa Adaptado de Tumuluru et al. (2011)

2.2.5.5.2 Conteúdo Energético

O conteúdo energético dos produtos de torrefação é a abordagem mais simples para determinar a viabilidade do processo e do aparato experimental. O objetivo da torrefação é aumentar as características do combustível comparado ao estado não tratado. A partir da avaliação dos poderes caloríficos das amostras da biomassa torrificada, é possível determinar o tempo residência e a temperatura ideal para fornecer um conteúdo energético otimizado (GENT et al., 2017).

2.2.5.6 Tipos de Reatores de Torrefação

Existem várias maneiras de controlar o processo de torrefação, uma delas é através da escolha do tipo de reator. Já existem estudos acerca da influência do reator na biomassa torrificada (BT) como atestado por Dhungana, Basu e Dutta (2012). Existem duas formas de abordar o desenho do reator: os de fluxo contínuo de biomassa e os de quantidade pré-determinada, sistema em lotes. Dentro dessas duas categorias, é possível classificar quanto a forma e injeção de calor no meio, através do contato direto com a fonte de calor ou contato indireto. A figura 9 mostra um esquema dos mais variados tipos de reatores para torrefação.

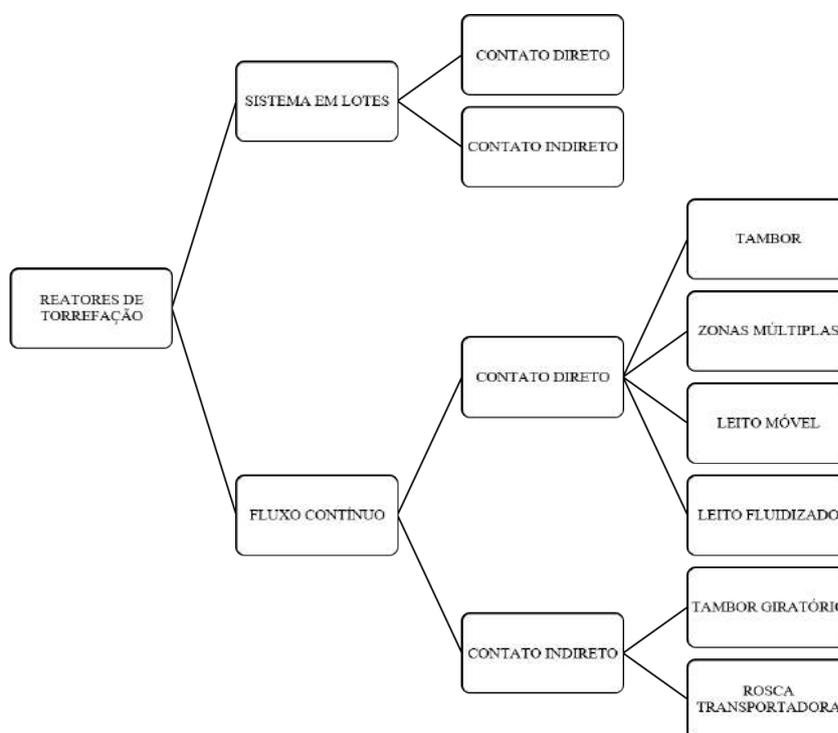


Figura 9 – **Relação dos tipos de reatores de torrefação** Adaptado de Gent et al. (2017)

2.2.5.6.1 Reatores de Sistema em Lotes

Em um sistema em lotes, o reator consiste em um vaso que é carregado de uma quantidade pré-determinada de biomassa para a reação. Esse tipo de reator permanece fechado durante o processo para prevenir o contato com ar. O calor fornecido externamente, por resistência elétrica, chama ou outra fonte, aquece o material até a uma temperatura específica de estudo. Uma vez que a reação é finalizada, a biomassa torrificada é coletada. Esse é um processo simples e é útil para a produção de pequenas quantidades de BT, porém trata-se de um processo não favorável quando aplicado em escala. A figura 10 mostra um esquema exemplo de um reator de torrefação em lotes.

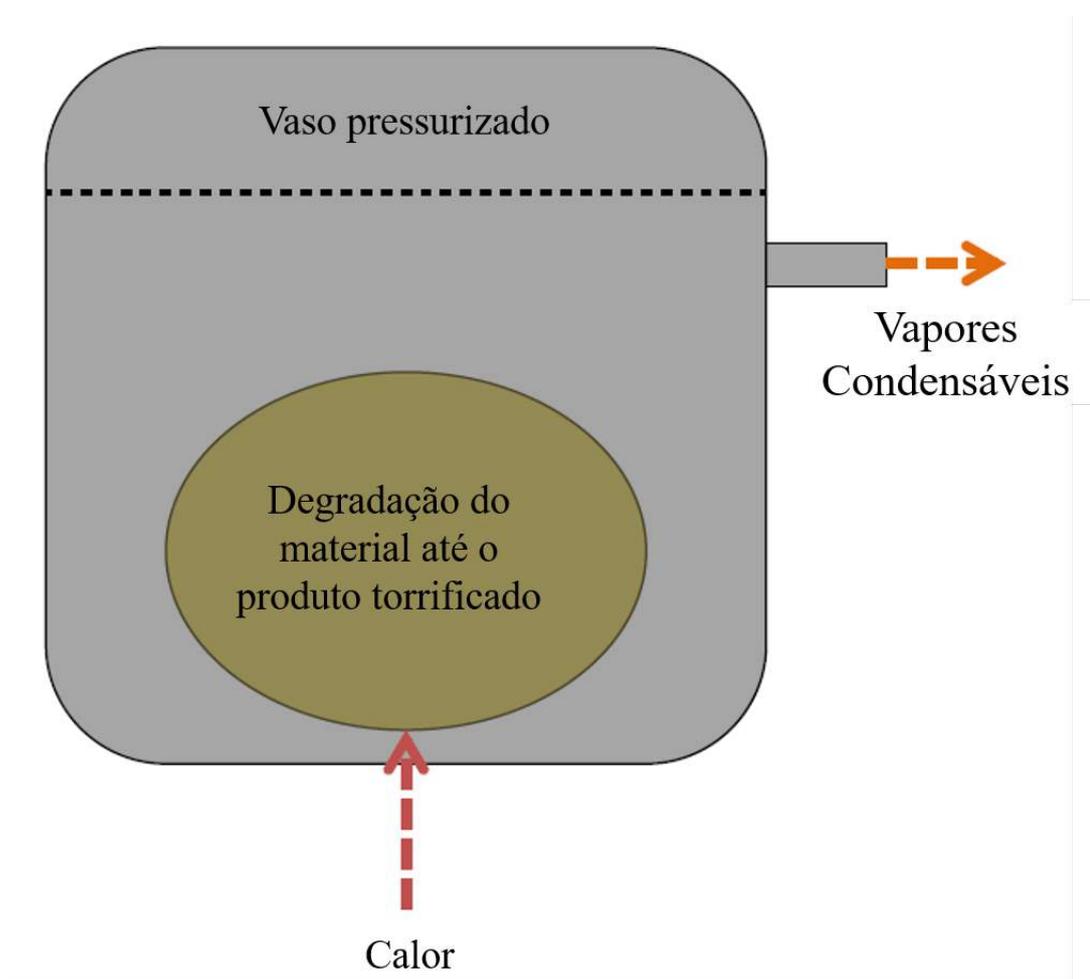


Figura 10 – Esquema simplificado de um reator de torrefação em lotes

2.2.5.6.2 Reatores de Fluxo Contínuo

Os reatores de fluxo contínuo possuem a habilidade de receber o material, realizar a torrefação e retirar a biomassa torrificada sem a necessidade de operar por lotes. Porém, esse tipo de reator necessita de alguns equipamentos adicionais como: uma correia para

transportar a biomassa, uma câmara de reação livre de oxigênio e um sistema de controle para a automatização.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de selecionados tipos de reatores de torrefação

Tipo de Reator	Vantagens	Desvantagens
Em Lotes	Design conhecido; Adequação de temperatura e tempo de residência; Aceita vários materiais para torrefação.	Oportunidades de escala limitadas; Não possibilita fluxo contínuo.
Tambor Rotativo	Equipamento simples; Queda de pressão baixa; Aquecimento direto ou indireto.	Menor capacidade de transferência de calor; Dificuldade em controlar a temperatura; Maior espaço necessário para instalação; Atenção quanto ao isolamento; Difícil trabalhar em escala.
Leito Móvel	Reator simples; Alta capacidade de transferência de calor; Leito de alta densidade.	Queda de pressão alta; Dificuldade em controlar a temperatura.
Rosca Transportadora	Possibilidade de fluxo de alta capacidade; Tecnologia de torrefação bastante conhecida.	Somente aquecimento indireto; Maior potencial de zonas quentes; Baixa taxa de transferência de calor; Problemas com escalonamento; Requer isolamento na entrada e na saída.
Leito Fluidizado	Alta taxa de transferência de calor; Potencial de escalonamento.	Requer granulometria menor; Equipamento de gás adicional necessário; Potencial de acúmulo de partículas finas

3 MEIOS E MÉTODOS

3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

3.1.1 Reator de Torrefação

Para este estudo, foi utilizado o corpo do reator que Gomes (2011) trabalhou em seu trabalho de mestrado. O reator consiste em um corpo cilíndrico com base e tampa semiesféricas, feito em aço inoxidável AISI 304L com dimensões principais 400mm de comprimento, 240mm de diâmetro externo e 200mm de diâmetro interno. A tampa e o corpo do reator são unidas por uma junta flangeada de 26mm de comprimento com furos onde passam parafusos de 1/2 polegada. A tampa possui no seu topo uma estrutura onde é parafusada o escape do reator, esse com uma mangueira e um pressostato analógico. Na base do reator existe uma estrutura com um furo de 20mm, por onde passa uma resistência cartucho, e furos de parafusos M5 para a fixação da flange da resistência. A resistência é do tipo cartucho de alta carga com 750W de potência e ela possui uma base flangeada para fixação.



Figura 11 – **Resistência elétrica cartucho com fixação por flange** retirado de Gomes (2011)

3.1.1.1 Concepção da Nova Tampa do Reator

Com a necessidade de monitoramento de temperatura, a tampa original do reator utilizado não seria útil, devido a ausência de acesso para os termopares. A partir disso, foi fabricada uma tampa em aço 1020 com espessura de 6mm através do corte a plasma. Como a tecnologia do corte a plasma não possui muita precisão para cortes menores,

foi necessário ajustar os furos com uma furadeira de mesa. Feito isso, foi utilizado um parafuso macho de rosca M5 para gerar a rosca dos parafusos de fixação da mangueira de saída do vapor de água dos voláteis expelidos durante o processo. Os desenhos técnicos da configuração do reator estão disponíveis no anexo A. Pode-se classificar este reator como um reator que opera por lotes e de aquecimento por contato direto.

3.1.1.2 Controle de Temperatura

Para manter a biomassa na temperatura selecionada de torrefação, foi adquirido um conjunto com uma placa de desenvolvimento, modelo Arduino Mega 2560, um shield keyboard LCD, um módulo de relé elétrico e três módulos Max6675 que fazem a leitura de termopares tipo "K". A partir disso, foi possível construir uma interface, em que o usuário pode selecionar a temperatura que o relé elétrico irá alternar a alimentação da resistência. Como a dissipação de calor da resistência para o material é mais lenta que a de aquecimento da resistência, foi necessário adicionar uma estrutura de código alternando a situação, ligado por um período de 5 minutos e desligado por 2 minutos, evitando a fusão do aço que envolve a resistência.

3.1.1.3 Configuração do Controlador Arduino

A programação da placa de desenvolvimento foi baseada em diversos exemplos, disponíveis no software "open-source" da empresa e dos fabricantes dos módulos utilizados.

A partir do algoritmo exemplo da empresa DfRobot, para teste de seu shield LCD Keypad, foi possível determinar uma rotina que basicamente aumenta ou diminui um vetor. Este vetor representava a temperatura na qual o relé elétrico alterna a alimentação da resistência elétrica. Uma vez selecionada a temperatura desejada, o usuário pressiona o botão "select" e, com isso, o arduino entra em uma rotina de monitoramento da temperatura nos três pontos onde os termopares estão alocados. O rotina de monitoramento dos sensores termopares também teve sua concepção a partir da adequação do exemplo presente na biblioteca max6675.h, que é da empresa Adafruit. O exemplo, por sua vez, só possui linhas de código para a leitura de somente um sensor, assim foi necessário adaptar o programa para declarar novos pinos digitais, e por último, repetir a rotina para os novos pinos declarados.

Enquanto o controlador opera em um loop de monitoramento de temperatura, uma variável de temperatura média foi adicionada dentro desse loop, com o intuito realizar o controle de alimentação do relé elétrico. Esta parte da programação foi baseada em um exemplo presente no próprio software do Arduino que se chama "blynk", onde a saída do pino digital é intermitente para o controle de uma lâmpada led presente na placa. A adaptação para o propósito de controle do relé foi simples, uma vez que foi somente

adicionada um comando de decisão de acordo com a temperatura média lida no loop atual.

3.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO LEITO

Para os ensaios de torrefação, as leituras dos termopares a cada loop de 1 segundo foram armazenadas em um arquivo de texto. Assim, foi possível realizar o tratamento dos dados ao possibilitar a aquisição de constantes referentes a biomassa como calor específico em diversas etapas do processo e, até mesmo, dados de condutividade térmica. Foi detectada uma diferença de leitura entre os termopares, já que eles estavam dispostos em locais de diferente penetração no leito. Na figura 12 tem-se a nomenclatura de cada termopar como A,B e C. O termopar A possui altura fixa de 10 cm abaixo da tampa e 10 cm de distância da resistência, o termopar B está fixado a uma altura de 20 cm abaixo da tampa a uma distancia de 6 cm da resistência e o termopar C possui altura móvel sempre junto à superfície do leito, porém a uma distância fixa de 8 cm da resistência. Dessa forma, foram aferidos valores de acordo com o nível do leito e distância da resistência.



Figura 12 – Visualização do display LCD

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E EQUIPAMENTOS

Com o reator montado, tampa e resistência acoplados, houve seguimento para os ensaios que realizados com os seguintes instrumentos:

- 3 Módulos MAX6675 para arduino
- 3 Termopares tipo K
- 1 Protoboard
- 1 Módulo de relé elétrico

- 1 Arduino Mega
- 1 Computador

3.4 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Os experimentos foram realizados partindo-se da torrefação em leito fixo, ao ter como substrato cavaco de madeira fornecido pela Votorantim Cimentos (VC). Os ensaios foram planejados em duas etapas. A primeira consiste em caracterizar o reator quanto a sua curva de aquecimento e a sua distribuição de dissipação de calor no leito, de acordo com altura relativa a base e distância relativa a resistência. A segunda etapa trata-se em variar o tempo de residência do material no estágio de torrefação e a temperatura de torrefação, que se dá entre 200°C e 300°C. O planejamento da segunda etapa consistiu na preparação de 8 amostras, dentre elas uma padrão para verificar a variação dos resultados obtidos. Também foi fabricada outra amostra para verificar a variação entre a biomassa que ficou entre a temperatura de secagem e a de torrefação. A tabela 3 dispõe as amostras de acordo com a temperatura de reação e seu tempo de residência naquela temperatura.

Tabela 3 – Planejamento de amostras

	Temperatura de Reação [°C]	Tempo de Residência [minutos]
Padrão	0	0
120 - 30	120	30
220 - 30	220	30
220 - 50	220	50
250 - 30	250	30
250 - 50	250	50
280 - 30	280	30
280 - 50	280	50

A figura 13 mostra como o cavaco de madeira fica de acordo com o grau de torrefação.



(a) Amostra 120 - 30



(b) Amostra 220 - 30



(c) Amostra 250 - 30

Figura 13 – Amostras fabricadas

Após o experimento concluído, o produto, cavaco de madeira torreficado, foi levado ao laboratório de análise de amostras, situado na fábrica de cimentos da VC em

Sobradinho - DF, para análise de umidade, PCI e teor de cinzas. A partir dos resultados obtidos nessa etapa, foi avaliado o potencial do produto gerado como combustível alternativo no queimador principal do forno de clínquer. Esse potencial foi determinado pelas características de poder calorífico inferior (PCI), de umidade, de granulometria e ao final do custo estimado de fabricação em escala.

3.5 ANÁLISES DAS AMOSTRAS

Após a realização de todas as amostras de biomassa torrificada com o reator adaptado, prosseguiu-se, então, os procedimentos adotados pela empresa para realização dos testes padrões de biomassa.

3.5.1 Determinação do Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade da amostra é facilmente obtida através da utilização do analisador de umidade infravermelho da marca Sartorius modelo MA35. O procedimento é simples: selecionar uma fração do material a ser analisado e prosseguir com o início da operação. Após cinco minutos, o teor de umidade é exposto na tela. A figura 16 mostra como é o aparelho utilizado nesse procedimento.



Figura 14 – Analisador de Umidade Infravermelho

3.5.2 Determinação do Poder Calorífico Inferior, PCI

A determinação do poder calorífico inferior se dá a partir de três etapas. Moagem do material, pesagem na balança de precisão e determinação do PCI.

3.5.2.1 Moagem do Material

Para a moagem, uma fração de biomassa foi alocada em uma panela. Essa panela é o nome dado ao revestimento externo do equipamento utilizado para moagem, que consiste em uma vaso com tampa e partes móveis internas, todos feitos de aço inoxidável. Após isso, foi encaixada a panela ao equipamento para dar sequência a moagem durante três minutos no equipamento da marca Herzog, o qual, por sua vez, segue com a vibração do conjunto instalado gerando a moagem. Feito isso, o conteúdo processado foi recolhido.



(a) Equipamento Herzog.



(b) Panela antes da moagem.



(c) Panela após a moagem.

Figura 15 – Equipamentos da Moagem

3.5.2.2 Dosagem na balança de precisão

Com o material recolhido, o procedimento padrão determina a dosagem de $0,2500 \pm 0,0005g$. Como visto na figura 16.

3.5.2.3 Determinação do PCI

Ao seguir os procedimentos padrões do equipamento da marca LECO modelo AC600, figura 17, foram determinados os valores de PCI das amostras. O equipamento registra a variação de temperatura do fluxo de água interno. Após o término do ciclo, o valor do PCI é exposto na tela do computador de comando do equipamento.



Figura 16 – Balança de precisão com amostra.



Figura 17 – Equipamento de determinação de PCI.

3.5.3 Determinação do Teor de Cinzas

Com material moído, proveniente do processo de determinação do PCI, foram utilizados pequenos cadinhos de porcelana para levar o material a mufla. Inicialmente, foi pesado o cadinho na balança de precisão para realização da tara. Depois, foram adicionados $1,0000 \pm 0,0005g$ de material no cadinho para, posteriormente, levar o cadinho e o material à mufla que se encontra a $750^{\circ}C$. A espera foi de cerca de 20 minutos para garantir a combustão de todo o material e, então, foi pesado o cadinho com as cinzas. Ao subtrair a massa final com o valor da tara, obteve-se o teor de cinzas. Como se trata de um procedimento que envolve o manuseio de materiais em altas temperaturas, o uso do equipamento de proteção individual, EPI, foi extremamente importante para que não exista ocorrências de acidentes. A figura 18 mostra como foi realizado o procedimento seguindo seguindo as normas de segurança.



Figura 18 – Mufla para determinação do teor de cinzas.

3.5.4 Análise dos Dados Coletados

Para a análise dos dados coletados, foi somente necessário um computador com licença e acesso a um software que possui manipulação de dados em forma de planilha. Dessa forma é possível organizar os dados e gerar gráficos para melhor entendimento e profundidade das informações adquiridas pelos testes.

4 RESULTADOS

4.1 NOVO REATOR DE TORREFAÇÃO

O novo reator de torrefação foi concebido com a junção do corpo do reator utilizado no trabalho de Gomes (2011) com a nova tampa fabricada. Para facilitar o manuseio do experimento, foi também fabricada uma estrutura de apoio, onde o reator fica a uma altura de 90cm do chão.



Figura 19 – Foto da nova tampa do reator

4.1.1 Controlador de Temperatura

Como dito na seção 3.1.1.2, foi formulado um código para o arduino que faz a leitura de temperatura por termopares tipo "K". Para este trabalho, utilizaram-se 3 termopares em alturas diferentes do leito para a verificação da temperatura. Na figura 20 é visível a utilização de uma protoboard para facilitar as conexões dos fios.

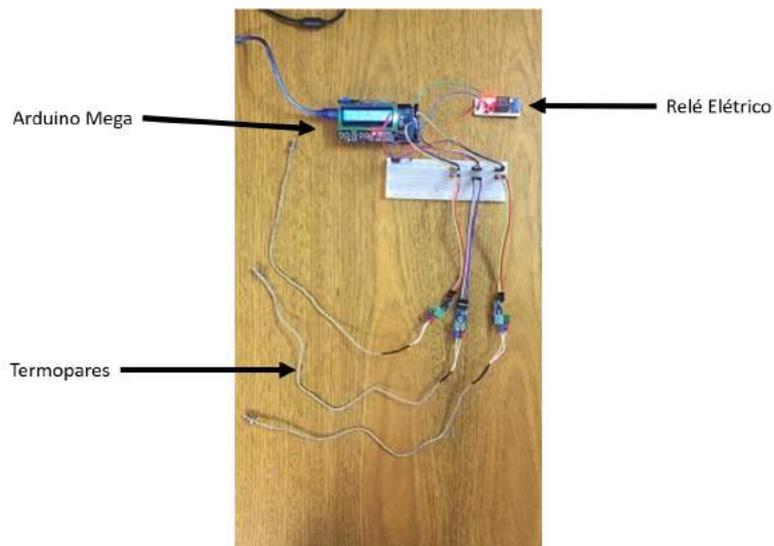


Figura 20 – Montagem do controlador de temperatura

4.1.1.1 Curva de Aquecimento do Reator

Era esperada uma diferença nas curvas de temperatura obtidas por cada um dos termopares, isso devido a heterogeneidade das etapas de torrefação de acordo com as diferentes alturas do leito. As curvas devem adotar situações de crescimento de temperatura, que serão determinadas de acordo com a fase de ganho de calor sensível, e situações de temperatura constante, as quais decorrerão do ganho de calor latente e do estágio de torrefação. Após a torrefação finalizada, será visível a curva de resfriamento do reator assumir um perfil linear até o ponto de parada de aquisição dos dados.

Foi realizado, então, um ensaio preliminar para validar o funcionamento do reator ao elevar a temperatura até 200°C. Para esse ensaio, o reator foi preenchido com biomassa fornecida pela VC e areia, afim de preencher os vãos entre os cavacos de madeira. Como se tratava de um ensaio preliminar, foi utilizado somente um termopar para a aquisição dos dados de temperatura no domínio do tempo, já que o período de aquisição era de 1 segundo.

A partir do gráfico da figura 21, verifica-se o permanecimento na temperatura de 100°C, o que indica a vaporização da umidade contida no cavaco de madeira. Após isso, a biomassa volta a elevar a sua temperatura até os 200°C, quando, então, foi cortado o fornecimento de energia à resistência. Dessa forma, foi realizado o último estágio do ensaio: a zona de resfriamento seguiu uma trajetória linear até o momento que foi cessada a aquisição de dados.

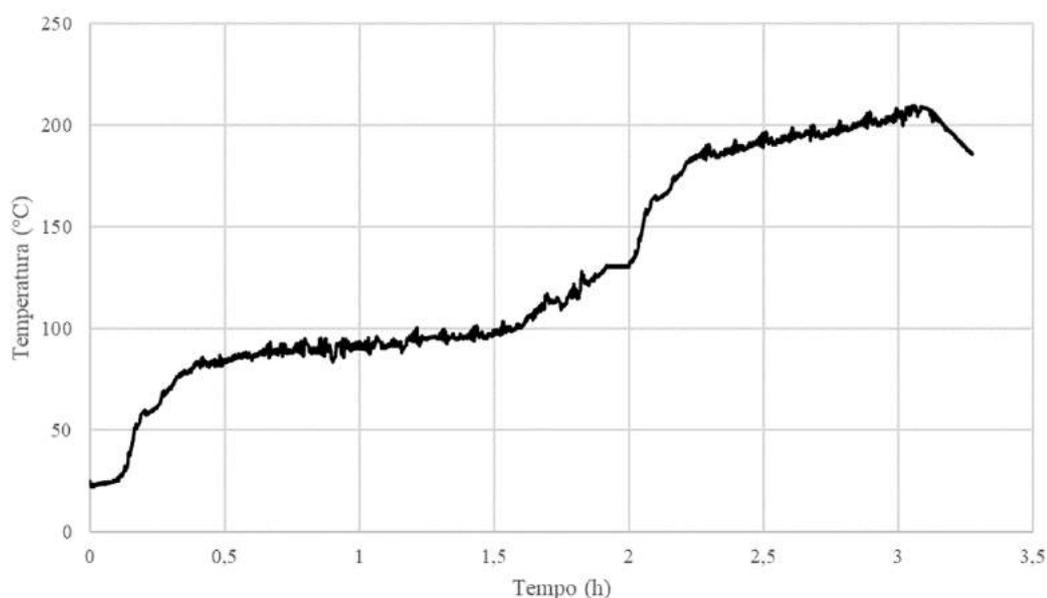


Figura 21 – Gráfico da curva de aquecimento do e resfriamento do ensaio preliminar

4.1.2 Resultados das Amostras

A tabela 4 dispõe os dados obtidos a partir dos testes laboratoriais. Os resultados serão discutidos nas seções subsequentes.

Tabela 4 – Teor de umidade, PCI, massa e percentual de cinzas obtidos obtidos por diferentes tempos e temperaturas por meio dos testes laboratoriais

	TRea [°C]	TRes [minutos]	Umidade [%]	PCI [kJ/kg]	Cinzas [mg]	Cinzas [%]
Padrão	-	-	19,08%	13588,6	0,34	0,03%
120 - 30	120	30	7,06%	15296,9	0,29	0,03%
220 - 30	220	30	3,60%	17610,5	0,98	0,10%
220 - 50	220	50	3,93%	17823,8	0,97	0,10%
250 - 30	250	30	4,37%	18548,0	1,04	0,10%
250 - 50	250	50	3,52%	18554,9	1,07	0,11%
280 - 30	280	30	3,74%	19179,1	1,16	0,12%
280 - 50	280	50	3,38%	19111,9	1,18	0,12%

4.1.2.1 Teor de Umidade

O teor de umidade é uma propriedade importante para combustíveis de biomassa, já que um alto índice de umidade leva a um alto gasto energético no decorrer da combustão. Assim, por meio da torrefação, foi constatada a diminuição da umidade presente nas amostras que passaram pelo reator em comparação com a amostra padrão. Nota-se,

também, uma diferença na amostra que não atingiu a temperatura de torrefação e isso evidencia uma mudança na estrutura física da madeira, a qual perdeu a capacidade de absorver umidade, reduzindo, então, sua higroscopicidade.

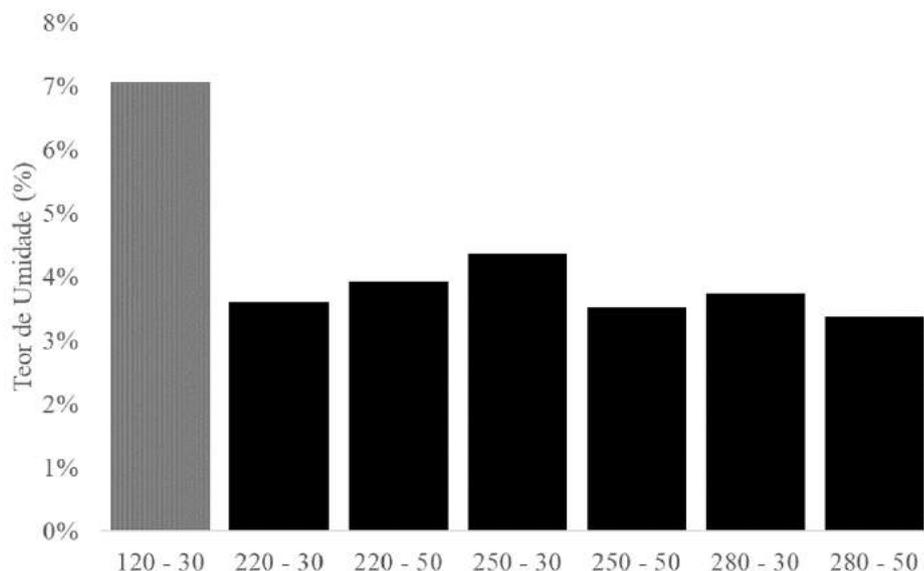


Figura 22 – Percentuais de umidade de acordo com os padrões de processamento

A figura 22 evidencia que, apesar de ter passado pelo processo de secagem, a primeira amostra (a 120 °C por 30 minutos - coluna cinza) não perdeu sua capacidade de reter umidade do ambiente. Isso está de acordo com as referências teóricas abordadas no estudo, uma vez que, abaixo de 200 °C, a estrutura celular não está completamente destruída.

Como observado na figura 23 adaptada de Gent et al. (2017), temperaturas abaixo de 150 °C ainda estão na faixa de secagem não reativa.

4.1.2.2 Poder Calorífico Inferior

O poder calorífico inferior, PCI, é um importante indicador da quantidade de energia que um combustível pode liberar durante seu processo de combustão. Esse indicador pode determinar a qualidade do insumo energético que chega para o processamento. Dessa forma, os dados apresentam um aumento considerável do PCI de acordo com o aumento da temperatura de torrefação da biomassa. Porém, não foi notada uma diferença significativa dos valores do PCI em relação ao tempo de residência do material, quando analisada a mesma temperatura de torrefação, como visto na figura 24. Isso provavelmente se deve ao aumento da degradação da biomassa com o aumento da temperatura, indicando que esse parâmetro é mais sensível de acordo com a temperatura de torrefação e não com o tempo de residência.

	Secagem não reativa		Secagem reativa	Estágios de Torrefação	
Estrutura celular	Sem mudanças químicas. Estrutura celular rompida – porosidade reduzida		Deformidade estrutural	Estrutura celular completamente comprometida – Frágil e não fibrosa	
Hemicelulose	Secagem		Despolimerização	Limitada carbonização e desvolatilização	Extensa carbonização e desvolatilização
Lignina	Secagem	Amolecimento		Limitada carbonização e desvolatilização	
Celulose	Secagem			Limitada carbonização e desvolatilização	
	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C 300°C

Figura 23 – Mudanças físicoquímicas ocorridas durante a torrefação de biomassas lignocelulósicas. Adaptado de Gent et al. (2017)

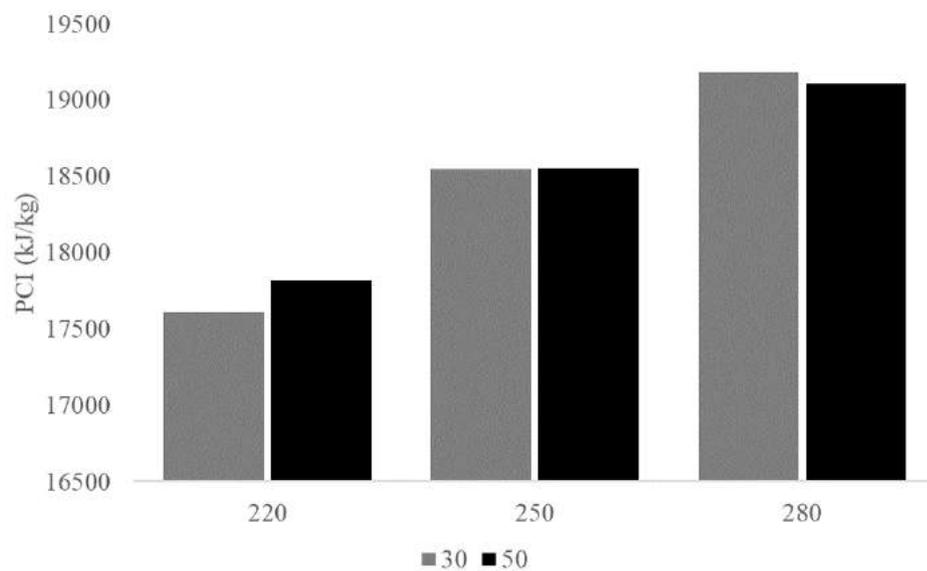


Figura 24 – Variação do PCI por estágios de temperatura de torrefação

4.1.2.3 Teor de Cinzas

Para a devida caracterização de um combustível, o teor de cinza influencia na quantidade de massa não reagente que esse combustível carrega. Indústrias como no caso da fabricação de cimento, onde o resíduo do combustível queimado incorpora na composição do produto final, esse parâmetro deve ser estudado ainda mais a fundo. Nos casos de combustíveis derivados de biomassa, é possível considerar que sua composição elementar é quase a sua totalidade em carbono. Sendo assim, basta caracterizar o percentual de cinza

obtido a partir dos testes realizados.

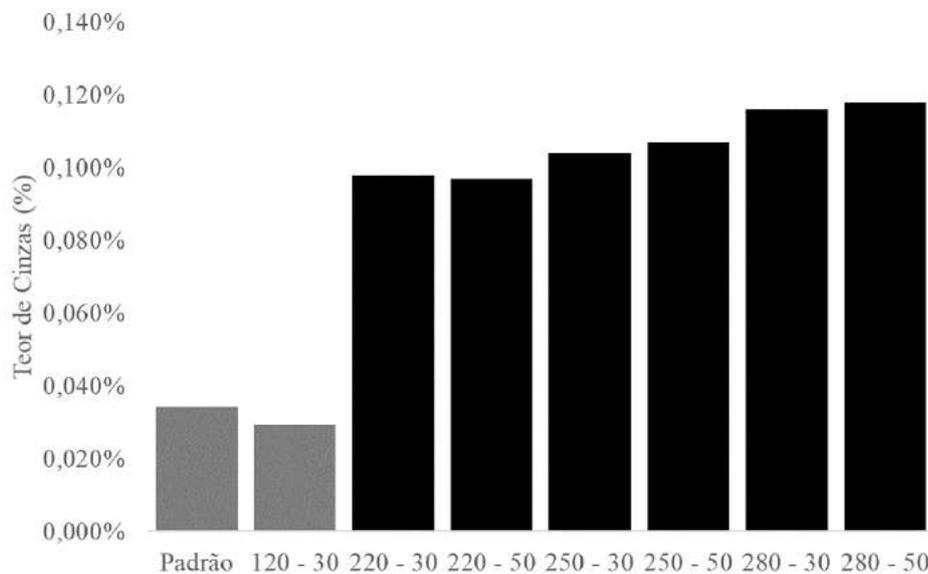


Figura 25 – **Diferença entre combustíveis torreficados e não torreficados**

A figura 25 mostra a perceptível diferença entre produtos que permaneceram na temperatura de torrefação (colunas pretas) e os que mantiveram sua estrutura celular intacta (amostra Padrão e a amostra submetida a 120 °C por 30 minutos - colunas cinzas). Interessante notar o leve aumento no teor de cinzas apresentado com o aumento da temperatura de torrefação a partir de 220 °C, isso deve-se a entrada na fase de desvolatilização e carbonização que acontece com as estruturas de hemicelulose, lignina e celulose.

Essa desvolatilização é justamente a emissão dos compostos voláteis que podem ser conhecidos como os gases de torrefação e esses gases podem ser reaproveitados e envasados para servir como gás combustível. Esse conceito foi verificado durante o processo de torrefação quando foi possível abastecer uma chama com os gases que saíam da mangueira do reator, como visto na figura 26

4.1.2.4 Moagem

Durante o processo de moagem também ficou evidente a facilidade do produto torreficado para moagem. A capacidade de um combustível de ser moído é de extrema importância para o processo produtivo, já que, como a combustão de combustíveis sólidos trata-se de uma combustão heterogênea, logo uma combustão por difusão, quanto menor for o tamanho da partícula, maior torna-se a superfície de contato facilitando, então, a queima do combustível. A figura 27 mostra a diferença das amostras 120 - 30, 220 - 30 e 250 - 30 quanto ao processo de moagem. Isso demonstra a discrepância na finura do material moído: a amostra que não passou pelo processo de torrefação ainda mantém uma



Figura 26 – Evidência de que gases de torrefação pode ser um gás combustível

estrutura fibrosa, o que pode acarretar em danos por entupimento da via de alimentação do queimador principal de fornos de clínquer.



Figura 27 – Comparação da biomassa após o processo de moagem

4.1.2.5 Potencial Como Combustível Alternativo

O produto cavaco de madeira torreficado possui potencial técnico para o uso como combustível alternativo para emprego na indústria cimenteira. Sua baixa umidade e baixa higroscopicidade o torna atrativo pela eficiência no processo de combustão dentro do forno e pelo armazenamento ao ar livre, já que muitas vezes a construção de um galpão destinado somente a este tipo de insumo é inviável. Seu PCI aperfeiçoado também é uma boa característica, uma vez que o parâmetro de decisão para a dosagem de cavaco de madeira no processo é justamente a densidade energética, já que o equipamento que

dosa essa entrada no forno possui limitação de vazão mássica. Logo, quanto maior o PCI, melhor. A facilidade de moagem devido a degradação parcial do composto também é uma vantagem, já que esse produto necessita passar pelo processo de moagem para ser aproveitado como combustível alternativo no queimador principal, o que torna esse processo mais produtivo. Por fim o teor de cinzas mais elevado deve-se ter a consideração de que esse material será incorporado junto a matéria-prima do clínquer, podendo gerar inconsistências na estrutura interna do produto final, que é o cimento.

5 CONCLUSÃO

5.1 Viabilidade de Emprego na Indústria Cimenteira

Uma vez caracterizado o produto cavaco de madeira torrificado, analisa-se a viabilidade de sua aplicação no cenário da indústria cimenteira. Atualmente, não existe uma fórmula definida empregada na indústria para validar a aplicação deste produto como combustível alternativo. No entanto, existem algumas recomendações, metas e características individuais de cada operação que pode tornar a biomassa torrificada um produto exequível na indústria cimenteira. Alguns itens importantes levados em consideração para a dosagem de combustíveis alternativos são: preço do insumo alternativo, valor do frete do insumo, preço do combustível principal, valor do frete desse combustível, qualidade da entrega do material, local de armazenamento, clima na região, composição química do mix de combustíveis, volume de vendas, entre outros. Por mais interessante que seja a aplicação do cavaco de madeira torrificado na indústria cimenteira, ainda existem poucas fábricas desse produto a volume expressivo que o torna economicamente viável. Porém, com o crescimento de estudos sobre o tema e possíveis aplicações no mercado, esse produto tem um grande potencial para suprir a necessidade do uso de combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o coque de petróleo.

Além disso, o presente estudo mostra que, com o aumento percentual de até 40% do poder calorífico inferior, a biomassa torrificada é um bom combustível alternativo, já que é possível aumentar a fração de biomassa na dosagem do mix sem comprometer o limite de vazão mássica do equipamento. O estudo também comprovou que o teor de umidade reduzido do cavaco de madeira torrificado e sua higroscopicidade são muito atrativos nos quesitos de armazenamento e manuseio desse material, e, agora, torna-se possível armazenar esse material em locais a céu aberto sem a preocupação com o aumento de sua umidade. Como visto também, o teor de cinzas desse combustível processado aumentou significativamente de 0,034% para 0,118% em relação a amostra padrão, mas ainda está longe do limite máximo de teor de cinzas que é permitido para a utilização que é 20%.

A indústria cimenteira pode ser uma grande contribuinte para a popularização desse tipo de substituição térmica, uma vez que sua utilização de combustível é intensa e sua emissão de gases como o CO_2 é excessiva por ser inerente ao processo. No entanto, como toda indústria, essa substituição deve gerar um benefício ao ser realizada. Este estudo caracterizou o produto de forma técnica e mostrou que o cavaco de madeira é um combustível alternativo viável. O que resta avaliar é o custo agregado na realização do processo de torrefação nesse material.

5.2 Futuros Estudos

A torrefação é um processo de conversão termoquímica ainda não muito explorado. Ele possui um alto potencial na substituição de combustíveis fósseis, o que leva a disponibilidade de aplicações tecnológicas diferenciadas para esse combustível. Portanto, uma possibilidade de estudo seria buscar formas de fabricação desse produto, de modo a reduzir o custo de produção para garantir visibilidade a tecnologia. Por exemplo, a elaboração de um reator de fluxo contínuo a partir da energia solar concentrada tem potencial de ser bastante interessante para a indústria.

Quando se olha a aplicação na indústria cimenteira, existem possibilidades de estudo sobre como se dá a combustão desse material dentro forno de clínquer, como a caracterização da chama proveniente dessa queima por difusão. Vale-se, também, o futuro estudo da incorporação química de suas cinzas na matéria prima do clínquer e da validação das mudanças físicas que isso pode causar na resistência final do cimento.

5.3 Execução do Cronograma de atividades

Ao seguir o cronograma de atividades adotado ao início do segundo semestre de 2018, visto na tabela 5, é possível concluir que as atividades programadas foram executadas.

Alguns pontos de atenção devem ser levantados ao executar o cronograma: o cuidado com integridade das resistências disponíveis, estas que são feitas sob encomenda; a segurança da vedação, para evitar a entrada oxigênio no reator e o cuidado com as peças do reator, como a estrutura da mangueira de escape, a qual é insubstituível, já que foi feita sob encomenda.

Tabela 5 – Cronograma de atividades propostas para este estudo

Atividades	2/2018	1/2019
Revisão bibliográfica	x	
Definição dos parâmetros de torrefação (Metodologia)	x	
Projeto do reator de torrefação	x	
Finalização do reator de torrefação	x	
Verificação operacional do reator	x	
Análise do produto quanto as características de combustível alternativo		x
Preparação do relatório final		x

Referências

- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology*, Elsevier Ltd, v. 101, n. 24, p. 9778–9784, 2010. ISSN 09608524. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.026>>. Citado na página 22.
- BARROS, J.; BORGES, J. ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE. 2017. Citado na página 19.
- BASU, P. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. [s.n.], 2013. 29–46 p. ISSN 1098-6596. ISBN 978-0-12-396488-5. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123964885000022>>. Citado 4 vezes nas páginas 5, 19, 22 e 23.
- BERGMAN, P. C. a. et al. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. *Energy research Centre of the Netherlands (ECN)*, n. July, p. 71, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--05-013>>. Citado 6 vezes nas páginas 5, 20, 21, 23, 24 e 25.
- DHUNGANA, A.; BASU, P.; DUTTA, A. Effects of Reactor Design on the Torrefaction of Biomass. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 134, n. 4, p. 041801, 2012. ISSN 01950738. Disponível em: <<http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1556810>>. Citado na página 26.
- GENT, S. et al. *Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction : for biofuels and value-added products*. [s.n.], 2017. 209 p. ISBN 9780128094839. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com.ezaccess.libraries.psu.edu/science/book/9780128094839>>. Citado 9 vezes nas páginas 5, 6, 19, 20, 23, 24, 26, 40 e 41.
- GOMES, I. Desenvolvimento De Um Reator De Carbonização Pressurizada Para Resíduos Agroindustriais. p. 110p., 2011. Citado 4 vezes nas páginas 5, 12, 29 e 37.
- GOYAL, H. B.; SEAL, D.; Saxena. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources : A review. v. 12, p. 504–517, 2008. Citado na página 19.
- LIMA, A. B. d. O PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO PORTLAND. 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-9C6HHC/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf?sequence=1>. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 16 e 17.
- MADLOOL, N. et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 2042–2060, 5 2011. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111000207>>. Citado na página 12.
- MEDIC, D. Investigation of torrefaction process parameters and characterization of torrefied biomass. *Investigation of Torrefied Process Parameters and Characterization*

of *Torrefied Biomass*, p. 123, 2012. ISSN 01903659. Disponível em: <<http://lib.dr.iastate.edu/etd/12403/>>. Citado na página 25.

MUJUMDAR, K. S. et al. Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 9, p. 2590–2607, 2007. ISSN 00092509. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 16.

PRINS, M. J. <*Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction (1).pdf*>. [S.l.: s.n.], 2005. ISBN 9038628862. Citado na página 24.

SHANG, L. et al. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Elsevier B.V., v. 108, p. 109–116, 2014. ISSN 01652370. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2014.05.010>>. Citado na página 20.

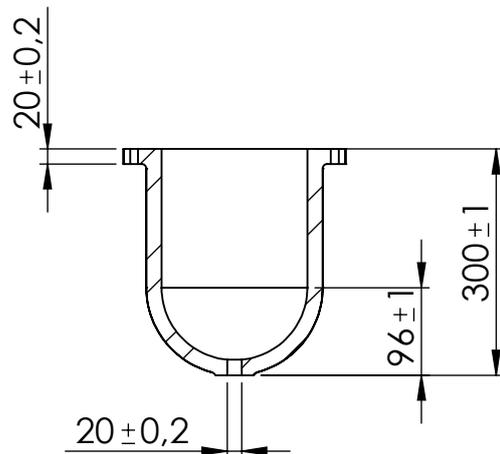
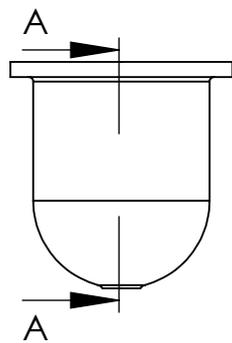
STADLER, K. S.; POLAND, J.; GALLESTEY, E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 19, n. 1, p. 1–9, 2011. ISSN 09670661. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.08.004>>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 15.

STELT, M. J. C. van der et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Ltd, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011. ISSN 09619534. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

TUMULURU, J. S. et al. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. n. OCTOBER, 2011. ISSN 1550-9087. Citado 3 vezes nas páginas 5, 24 e 25.

WILD, M. *Torrefied Biomass: Available, Efficient, CO₂ Neutral and Economic – likely the best solid biomass on the market : Biofuels Digest*. 2016. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/10/20/torrefied-biomass-available-efficient-co2-neutral-and-economic-likely-the-best-solid-biomass-on-the-1>>. Citado na página 12.

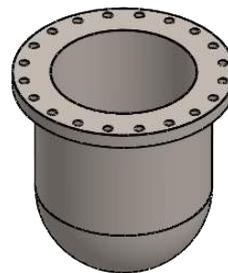
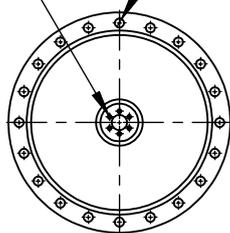
ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS DO REATOR



SEÇÃO A-A

20 x M12 - PASSANTE TOTAL

6 x M5 ∇ 8,5



UnB

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Disciplina : Projeto de Graduação 1

Professor: Carlos Alberto Gurgel Veras

Alunos:
Luiz Felipe Nerva Blumm

Corpo do Reator

Material: AISI 304L

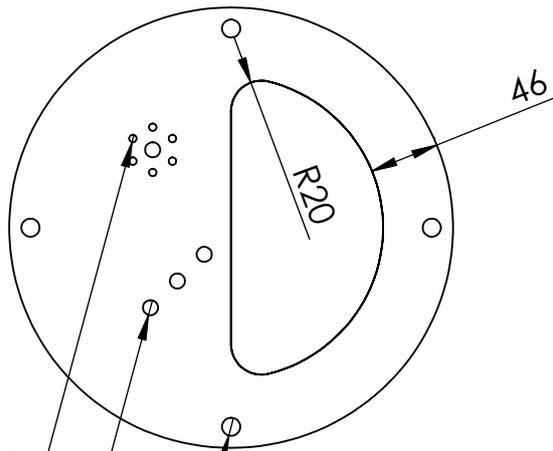
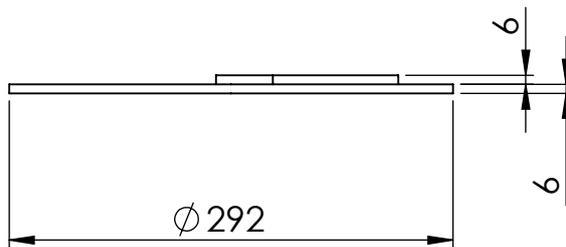
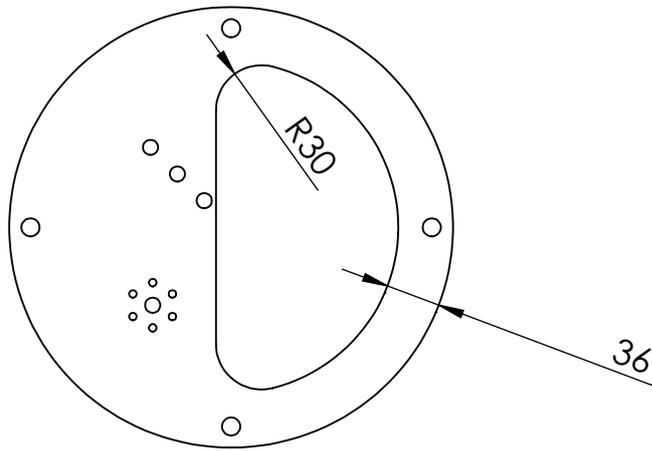
Vista: 1º Diedro

Escala: 1:10

Unidade:
milímetros

Nº: 1 de 1

Revisão: REV1



ϕ M5 - PASSANTE TOTAL

ϕ 3 x 10 - PASSANTE TOTAL

ϕ 4 x 12 - PASSANTE TOTAL

UnB

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Disciplina : Projeto de Graduação 1

Professor: Carlos Alberto Gurgel Veras

Alunos:
Luiz Felipe Nerva Blumm

Tampa do Reator e Escotilha de Acesso

Material: AISI 1020

Vista: 1° Diedro

Escala:1:5

Unidade:
milímetros

Nº:1 de 1

Revisão:REV1