

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO FONSECA RODRIGUES DA CUNHA
LUANA FURTADO MESSIAS GOES

**ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM
AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA

UBERLÂNDIA
2022

CAIO FONSECA RODRIGUES DA CUNHA
LUANA FURTADO MESSIAS GOES

ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM
AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS

Projeto de Fim de Curso, apresentado como exigência parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica, à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho

UBERLÂNDIA

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 2022	<p>Cunha, Caio Fonseca Rodrigues da, 1999- ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS [recurso eletrônico] / Caio Fonseca Rodrigues da Cunha. - 2022.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G598 2022	<p>Goes, Luana Furtado Messias, 2000- ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS [recurso eletrônico] / Luana Furtado Messias Goes. - 2022.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA
EM AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS

Projeto de Fim de Curso, apresentado como exigência parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica, à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Cavalho

Uberlândia, 30 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho – UFU
Orientador

Doutorando Vitor Alberto Lemes Monteiro
BANCA EXAMINADORA

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Uberlândia por ter possibilitado a realização de nossos cursos e desse projeto.

Ao Laboratório de Transferência de Calor e Massa por ter disponibilizado os equipamentos e amostras que tornaram possível a realização desse trabalho.

Ao nosso professor orientador Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho por todo o apoio e disponibilidade tanto como professor quanto no decorrer desse projeto, onde fomos além do que é ensinado em sala de aula.

A todos os professores que fizeram parte de nossa vida acadêmica e nos deram base para esse momento.

A coordenação do curso de Engenharia Mecânica e em especial à Professora Dra. Núbia dos Santos Saad, que em meio a instabilidades e dificuldades nos deram apoio que possibilitou a conclusão do curso sem prejuízos.

A todos os nossos amigos e colegas de classe que fizeram parte dessa jornada e nos ajudaram a chegar até aqui.

Eu Caio agradeço a minha família por todo o apoio, em especial a meus pais Ivan Pereira Rodrigues da Cunha e Melissa Soares Fonseca, minha irmã Beatrice Fonseca Rodrigues da Cunha e meus avós Luiz Eugênio da Fonseca, Thais Abbott Soares Fonseca e Marisa Pereira Ribeiro.

À Laura Campos Prado que me acompanhou nesse processo por toda a paciência, apoio e compreensão.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esse processo.

Eu Luana agradeço a minha família por todo o apoio e incentivo a sempre seguir meus sonhos, em especial as mulheres mais especiais, minha mãe Luzinete, minha querida irmã Bruna e a minha avó Maria do Ceo.

Ao Fred pelo suporte, carinho e paciência.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período da faculdade.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CALORÍMETRO DE GELO DE LAVOUISER E LAPLACE (FONTE: PRENTICE, 1995)	14
FIGURA 2: TRÊS COMPOSTOS SÓLIDOS DISTINTOS DE COLORAÇÃO ESCURA: A) AMOSTRA 1, B) AMOSTRA 2, c) AMOSTRA 3	21
FIGURA 3: DOIS COMPOSTOS SÓLIDOS DISTINTOS DE COLORAÇÃO CLARA: A) AMOSTRA 4, B) AMOSTRA 5	21
FIGURA 4: TGA-2000A	22
FIGURA 5: TGA-2000A COM AMOSTRAS EM FASE DE PESAGEM	23
FIGURA 6: TGA-2000A COM AMOSTRAS JÁ TAMPADAS, PRONTO PARA INICIALIZAR	23
FIGURA 7: CONEXÃO DOS GASES COM A MÁQUINA TGA-2000A	24
FIGURA 8: A) BOMBA CALORIMÉTRICA IKA C 200; B) BALANÇA ANALÍTICA COM PRECISÃO DE 0,1MG; C) ESTUFA CAPAZ DE ATINGIR 105°C; D) EQUIPAMENTO PARA PRESSURIZAR O CILINDRO DA BOMBA CALORIMÉTRICA COM OXIGÊNIO PURO; E) BANHO TERMOSTÁTICO.	25
FIGURA 9: CADINHO SENDO PESADO COM AMOSTRA	26
FIGURA 10: A) CADINHO INSERIDO NA ESTRUTURA EM CONTATO COM O FILAMENTO E B) RECIPIENTE CONTENDO A AMOSTRA PREPARADO PARA SER INSERIDO NA BOMBA CALORIMÉTRICA	26
FIGURA 11: PROBLEMA NA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA: A) CARROSSEL COM RESINA; B) EIXO CENTRAL DO TGA DANIFICADO; C) ASPECTO DA AMOSTRA 5 E D) DA AMOSTRA 4	28
FIGURA 12 - PONTO DE FULGOR AMOSTRA 1	32
FIGURA 13 - PONTO DE FULGOR AMOSTRA 2	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARATIVO ENTRE OS COMPOSTOS ANALISADOS.....	28
TABELA 2: COMPARATIVO ENTRE O PCI DAS AMOSTRAS ANALISADAS	30

SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

GEE	Gases de efeito estufa
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
LTCM	Laboratório de Transferência de Calor e Massa
PC	Poder calorífico [kJ/kg]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior [kJ/kg]
PCU	Poder calorífico útil [kJ/kg]
TG	Termogravimétrica
TGA	Análise Termogravimétrica

DA CUNHA, C.F.R; GOES, L.F.M. **ENSAIOS DE CALORIMETRIA E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM AMOSTRAS ALEATÓRIAS E DESCONHECIDAS.** 2022. 38p. Projeto de fim de curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

A análise de propriedades calorimétricas e termogravimétricas tem sido cada vez mais importantes para identificação e comprovação da composição de amostras desconhecidas, devido a grande abrangência desses testes e a evolução dos equipamentos que as realizam. Descobrir as propriedades de uma substância e poder categorizá-la abre espaço para diversas aplicações e um melhor entendimento de qual finalidade dar a esse composto. O presente trabalho foi realizado através dos equipamentos do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia, onde foram selecionadas 5 amostras e realizados os testes de calorimetria e análise termogravimétrica de acordo com as normas nacionais e internacionais. Por fim, foi possível identificar as 5 amostras em relação a composição e distribuição desta entre matéria orgânica e inorgânica para todas as substâncias. Essa constatação foi possível devido à análise de poder calorífico e das propriedades obtidas pela análise imediata, teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Além disso, foi determinado o ponto de fulgor para as amostras 1 e 2.

Palavras-chave: identificação, amostras desconhecidas, calorimetria, análise termogravimétrica e ponto de fulgor.

DA CUNHA, C.F.R; GOES, L.F.M. **CALORIMETRY AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS TESTS ON RANDOM AND UNKNOWN SAMPLES**. 2022. 38p. End of course project, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The analysis of calorimetric and thermogravimetric properties has been increasingly important in the identification and proof of the composition of random samples, due to the large scope of these tests and to the evolution of the machinery used. Discovering the properties of a substance and being able to categorize it gives space to diverse applications and allows a better comprehension of what this compound can be used for. The present project was carried out with the equipment of the Heat and Mass Transfer Laboratory at the Federal University of Uberlândia, where 5 different samples were selected and the tests of calorimetry and thermogravimetric analysis were realized according to national and international regulations. Finally, it was possible to identify the five samples in relation to their composition and distribution of organic and inorganic matter for all of them. This realization was possible due to the analysis of calorific power and to the properties obtained by the thermogravimetric analysis, moisture, volatiles, ashes and fixed carbon percentages. Furthermore, the flash point was determined for samples 1 and 2.

Keywords: identification, organic compound, calorimetry, thermogravimetric analysis and flash point.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	11
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 COMPOSTOS ORGÂNICOS.....	12
2.2 CALORIMETRIA APLICADA NA ANÁLISE DE BIOMASSA.....	13
2.2.1 PODER CALORÍFICO.....	15
<i>i. Poder calorífico superior</i>	15
<i>ii. Poder calorífico inferior</i>	16
<i>iii. Poder calorífico útil</i>	16
2.3 TERMOGRAVIMETRIA.....	16
2.3.1 TEOR DE UMIDADE	18
2.3.2 TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS.....	19
2.3.3 TEOR DE CINZAS	19
2.3.4 TEOR DE CARBONO FIXO.....	20
2.3.5 PONTO DE FULGOR	20
3 METODOLOGIA	21
3.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	21
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NO ANALISADOR TERMOGRAVIMÉTRICO: TGA-2000A.....	22
3.3 CALORIMETRIA.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS	27
4.2 ANÁLISE DE PCI.....	30
4.3 PONTO DE FULGOR.....	31
5 CONCLUSÃO	33
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelas tecnologias alternativas de geração de energia proveniente da biomassa é resultado do aumento da quantidade de resíduos decorrentes da agricultura e a necessidade do descarte correto com o aproveitamento econômico. Além disso, as pressões sociais por fontes limpas de energia, principalmente, as fontes que não liberem GEE, vem intensificando essa busca (TOLMASQUIM, 2005).

A análise térmica de compostos tem um papel fundamental na identificação e estudo de composição de substâncias, uma vez que permite que sejam conhecidas diversas propriedades importantes dos compostos para diversas finalidades, podendo ser uma delas a geração de energia. Com isso, é possível definir os produtos, entender o comportamento destes e escolher os mais adequados para cada operação, evitando possíveis danos e prejuízos.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram realizar as análises calorimétrica e termogravimétrica de cinco amostras desconhecidas e posteriormente identificá-las. Foram realizados experimentos com uma biomassa conhecida de forma a certificar que os equipamentos usados nos testes estavam devidamente calibrados. A partir disso, foram realizadas comparações com a literatura de forma a identificar cada tipo de amostra.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica contendo definições e a importância da identificação de compostos para possíveis aplicações, estudo e definições sobre calorimetria e análise termogravimétrica, com contextualizações históricas.

No Capítulo 3 foi descrito todo o procedimento experimental para a realização dos testes de acordo com as normas vigentes. A metodologia consistiu na preparação das amostras e equipamentos, cálculos realizados, imagens dos experimentos e formas de obtenção dos resultados apresentados, desde o recebimento das amostras até a realização dos testes de calorimetria e análise imediata.

No Capítulo 4 foram discutidos todos os resultados obtidos através dos processos descritos na parte de metodologia utilizando as informações elencadas na parte de fundamentação. As amostras foram analisadas e posteriormente comparadas entre si em todos os aspectos apresentados, obtidos na análise termogravimétrica e nos ensaios de calorimetria, bem como realizando comparações com dados da literatura e com uma biomassa de propriedades conhecida.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho em relação as expectativas e objetivos iniciais e propostas para trabalhos que possam ser realizados posteriormente.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 COMPOSTOS ORGÂNICOS

A diferença entre compostos orgânicos e inorgânicos é notada, principalmente, pela existência do carbono como elemento principal do composto e pela capacidade de formar cadeias curtas ou longas, que são observadas em qualquer substância orgânica (ROQUE, 2009). Já as matérias inorgânicas não possuem essas características e podem ser divididas em quatro tipos de funções: ácidos, bases, óxidos e sais. Além disso, existem outras diferenças como a condutividade elétrica, temperaturas de fusão e ebulição, que estão relacionadas com os tipos de ligações que cada composto apresenta (ATKINS, 2001).

Qualquer matéria orgânica que pode vir a se transformar em energia térmica, mecânica ou elétrica é considerada biomassa. De acordo com a sua origem, podem ser classificadas como: agrícolas (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras), florestais (madeira, principalmente) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os materiais provenientes de processamentos dessa matéria orgânica dependem tanto da matéria-prima utilizada, no qual o potencial energético poder variar de tipo para tipo, quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (ANEEL, 2008).

Tendo em vista sua vasta população, além da grande produção de alimentos, combustíveis, criação de animais e variados processos produtivos que eliminam subprodutos passíveis de aproveitamento na produção de energia renovável, o Brasil é um grande gerador de resíduos orgânicos (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Ainda segundo Oliveira *et al.* (2016) tanto no Brasil quanto no mundo, o uso da biomassa como fonte energética vem crescendo a cada ano, buscando sempre incentivar a valorização dos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Sendo assim, resíduos ou subprodutos orgânicos de processamentos diversos podem ser recuperados em forma de energia renovável. Essas fontes de energia têm grande vantagem, uma vez que muitas delas podem ser utilizadas no mesmo local onde foram geradas, dessa forma, é possível descentralizar a produção de energia, minimizar a logística e, ainda, criar possibilidades de autossuficiência energética para diversos produtores.

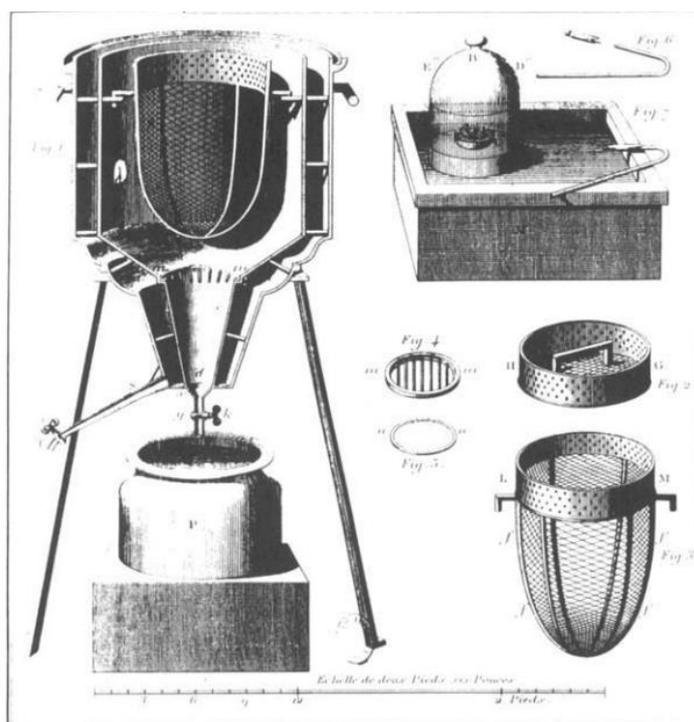
2.2 CALORIMETRIA APLICADA NA ANÁLISE DE BIOMASSA

A palavra calorimetria foi criada para tratar do estudo da troca de energia entre corpos em forma de calor, e tem sua origem provinda da termodinâmica. À transferência de energia térmica entre corpos diferentes, dá-se o nome de calor. O estudo da troca de calor entre um objeto para um outro tem seu início datado quando a ciência diferenciou claramente o conceito de calor e temperatura que ocorreu no fim do século XVIII com Joseph Black (1728-1799), cientista inglês afamado por descobrir o gás dióxido de carbono (CO_2), além de seus estudos em calorimetria que incorporar o termo calor latente de vaporização e o geral de capacidade calorífica (ou calor específico) (PEREIRA, 2014).

Em 1784, Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) e Pierre Simon Laplace (1749-1827) divulgaram a descrição do aclamado calorímetro de gelo criado por estes e de sua aplicação em vários estudos. Este calorímetro é um receptáculo dividido em três seções, nas quais duas são externas onde colocava-se gelo e a outra seção interna, era o local onde se encontrava o objeto estudado à alta temperatura, previamente aquecido. Quando o objeto com alta temperatura chegasse a uma temperatura de equilíbrio com o restante do sistema, certa quantia de água formada pelo derretimento do gelo era drenada pela torneira que se encontrava abaixo do calorímetro, essa quantidade de água era pesada posteriormente e conhecendo-se o calor de fusão do gelo, o calor liberado por esse processo podia ser calculado pela massa de gelo fundido durante o processo (PEREIRA, 2014).

Desde então, os estudos sobre esse equipamento de medição de poder calorífico vêm se desenvolvendo e atualmente os experimentos modernos exigem que estes calorímetros sejam cada vez mais precisos e segmentados, possuindo uma grande quantidade de canais de leitura, os quais devem operar simultaneamente a uma alta taxa de eventos.

Figura 1: Calorímetro de gelo de Lavoisier e Laplace (Fonte: PRENTICE, 1995)



O procedimento experimental típico baseia-se na troca de calor entre a amostra de material a ter seu calor específico determinado com uma amostra de água. Para isso colocam-se as duas amostras inicialmente a temperaturas distintas e conhecidas e observa-se então a temperatura de equilíbrio, que é obtida monitorando-se a temperatura da água. Baseado no princípio de conservação de energia todo o calor que sai de uma das amostras deve ser absorvido pela outra na situação ideal em que o sistema é isolado. O isolamento completo se obtém através de um calorímetro idealizado, que não absorve calor, nem permite que haja trocas de calor entre o sistema e o ambiente que o cerca (COSENTINO; RIOS, 2019).

O calorímetro é um instrumento cujo objetivo é medir transformações energéticas onde há alterações de temperatura ou então ainda quando ocorre transferência de calor com o ambiente. Esse equipamento, normalmente, pode ser

dividido em duas partes: o vaso calorimétrico, onde o processo é realizado, e o ambiente ou vizinhança. Mesmo com vários critérios para a classificação de um calorímetro, a classificação mais geral visa as trocas de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente, dessa forma, são divididos em três tipos principais de calorímetros: adiabático, isoperibólico (ou jaqueta isolante) e o de condução de calor (CIAMPI, 1992).

Segundo Ciampi (1992), no calorímetro adiabático não há troca de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente, equipamentos estes de complexa operação e utilizados para determinação de calores específicos em temperaturas bem diferentes do ambiente. Em um calorímetro de condução de calor, o calor é transferido do vaso calorimétrico para o ambiente, que funciona como reservatório de calor, utilizados principalmente, como microcalorímetros para processos lentos geralmente em sistemas bioquímicos. Já o calorímetro isoperibólicos, encontra-se entre os outros dois tipos de calorímetro, o vaso calorimétrico não está totalmente isolado do ambiente, de modo que um pequeno fluxo de calor ocorre entre ambos.

2.2.1 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico (PC) pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de um combustível. Essa propriedade tende a variar conforme as propriedades químicas e o teor de umidade do combustível (ZUIM, 2013). Ao avaliar um combustível, o poder calorífico é a propriedade mais importante uma vez que ele fornece o potencial energético do combustível (PESSOAS FILHO, 2013).

O poder calorífico pode ser analisado como: superior, inferior e útil.

I. PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de energia em forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa de combustível seco, sendo a água proveniente da combustão do hidrogênio de composição condensada ao estado líquido e o calor decorrente desta condensação sendo recuperado. O PCS determina o potencial energético teórico dentro do combustível e é obtido via processo experimental que utiliza um calorímetro (ou bomba calorimétrica) (CIAMPI, 1992).

O processo de definição do PCS não pode ser comparado a um processo real de combustão no qual a água continua no estado de vapor e é liberada juntamente com os gases de combustão (PESSOA FILHO, 2013).

II. PODER CALORÍFICO INFERIOR

Já o poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas da água evaporada, ou ainda, o valor obtido ao se considerar a água no estado de vapor ao final da combustão (QUIRINO et al, 2004; CIAMPI, 1992).

Como não existe um equipamento que indique o PCI ele pode ser calculado a partir do PCS. O PCI pode ser calculado deduzindo do PCS à quantidade de energia em calor necessária para vaporizar a água presente na amostra, mais o vapor d'água formado da combustão do hidrogênio contido na amostra (PESSOA FILHO, 2013).

III. PODER CALORÍFICO ÚTIL

O poder calorífico útil (PCU) é o PCI em base úmida (PESSOA FILHO, 2013).

Grande parte dos sistemas que utilizam biomassa para a geração de energia não secam o material abaixo de 10% de umidade, assim o poder calorífico que mais se aproxima da realidade é o PCU, derivado do PCI, e que toma como base um determinado teor de umidade. (VALE & BRASIL, 1997 apud TAKESHITA; JÚNIOR, 2017).

Para determinar o poder calorífico superior é necessário seguir a norma ABNT NBR 8633/1984.

2.3 TERMOGRAVIMETRIA

Ionashiro (2004) relata a origem da termogravimetria e a criação e evolução da termobalança. A história se inicia pela busca de se entender sobre as alterações que o aquecimento e o calor podem provocar na massa de variadas substâncias já é antiga, com o propósito de estabelecer a faixa de temperatura na qual a decomposição se inicia, além de seguir o desenvolvimento de reações de desidratação, oxidação, etc. Desde o início do século XX, pesquisadores tentam construir, ponto a ponto, as curvas de perda de massa em função da temperatura, de forma a aquecer amostras até uma temperatura determinada e então pesá-las.

O pesquisador Kotara Honda (1870-1954) desenvolveu a primeira termobalança, em 1915, ele também foi o criador da palavra termobalança. Este instrumento foi aplicado para analisar as curvas de decomposição térmica do sulfato manganoso, do gesso e do anidrido crômico. O trabalho de Honda serviu como base de todos os trabalhos futuros em termogravimetria, uma vez que sua balança possibilitou pela primeira vez a realização da pesagem contínua da amostra a medida em que esta era aquecida. Esse equipamento também utilizava sistemas de aquecimento praticamente isotérmicos, já que empregava uma razão de aquecimento muito lenta (10 -14 horas para alcançar 1000°C), e assim que começasse uma transição com perda de massa, se mantinha a temperatura constante até a transição ser completada (cerca de 1-4 horas).

Ao longo dos anos vários outros pesquisadores se empenharam na evolução da termobalança. Dois outros momentos significativos na história da termogravimetria moderna se passaram em 1958 e em 1964. Paulik *et al.* (1958) descreveram um equipamento multifuncional capaz de registrar simultaneamente curvas termogravimetria (TG), termogravimetria derivada (DTG) e análise termogravimétrica (DTA) que denominaram Derivatograph.

Ainda segundo Ionashiro (2004) em 1964, H. G. Wiedemann, explicou o sistema termoanalisador Mettler que possuía a capacidade de registrar simultaneamente as curvas TG, DTG, DTA e Temperatura x tempo, em atmosferas estáticas ou dinâmicas ou sob vácuo. Desde então o estudo da termogravimetria tem evoluído até os dias atuais onde os sistemas de registro são através de computadores e os instrumentos atuais permitem controlar a atmosfera que ao redor da amostra, liberando assim o trabalho com atmosferas estáticas ou dinâmicas a pressão ambiente ou, ainda, sob pressão reduzida.

A termogravimetria é uma técnica de análise térmica em que a mudança na massa da amostra é determinada em uma função da temperatura e/ou tempo (WENDLANDT, 1986). Parâmetros como tempo, peso e temperatura são essenciais (PARTHASARATHY *et al.*, 2013).

Pode-se dizer que o equipamento da análise termogravimétrica é composto basicamente pela termobalança. O equipamento pode mudar de configuração de um fabricante para outro, mas os fundamentos de todos eles são os mesmos. A termobalança é um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em

função da temperatura, ou seja, à medida que ela é aquecida ou resfriada. Os principais componentes de uma termobalança são: balança registradora, forno, suporte de amostra e sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, sistema registrador e controle da atmosfera do forno (DENARI e CAVALHEIRO, 2012).

A termogravimetria é fundamental para a análise de um composto, dependendo do caso podendo ser seguida da cromatografia para a análise dos componentes emitidos na etapa de volatilização, identificação dos compostos liberados. A TGA auxilia a entender o comportamento da amostra analisada, como sua umidade, teor de materiais voláteis, que são fundamentais no estudo de um composto a ser utilizado como combustível, teor de cinzas, e percentual de carbono fixo.

A análise imediata é realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, esta consta da determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

2.3.1 TEOR DE UMIDADE

Teor de umidade pode ser definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida quanto na base seca, qual pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (NOGUEIRA e LORA, 2003)

Sua determinação é de grande importância, pelo fato de que a água apresenta um poder calorífico negativo, uma vez que necessita de calor para evaporá-la (BRITO; BARRICHELO, 1979). Sendo o teor de umidade tem influência tanto na armazenagem quanto no processo de combustão.

Para a determinação da umidade de uma amostra, determina-se a massa desta e então ela é levada a uma estufa de circulação de ar forçada a 105 °C onde permanece até que não haja mais alteração em sua massa, sendo conferida periodicamente através da mesma balança de precisão. Uma vez que a massa da amostra para de variar, esta pode ser retirada da estufa e então seu teor de umidade é calculado da seguinte forma:

$$TU_{b.u.} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} * 100 \quad (2.1)$$

Sendo $TU_{b.u.}$ o teor de umidade da amostra em base úmida em [%], m_0 a massa inicial e m_1 a massa final da amostra após a secagem.

2.3.2 TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS

O teor de voláteis é a parte da biomassa que evapora como um gás (incluindo umidade) por aquecimento, ou seja, o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra até temperaturas de aproximadamente 950 °C (MCKENDRY, 2002).

O procedimento para obtenção do teor de materiais voláteis de uma amostra consiste em que através de uma balança analítica obter 1,0 g da amostra isento de umidade. Esta será colocada em um cadinho seco, com massa definida através da mesma balança analítica. O cadinho será colocado na mufla a 900 ± 10 °C por 7 minutos.

Em seguida, a amostra é colocada para resfriar e, posteriormente, sua massa é aferida para determinação do teor de materiais voláteis, de acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, através da seguinte fórmula:

$$TMV = \frac{m_2 - m_3}{m} * 100 \quad (2.2)$$

Sendo TMV o teor de materiais voláteis [%], m_2 é a massa inicial do cadinho somada a massa da amostra [g], m_3 é a massa final do conjunto e m é a massa da amostra seca [g]. O teor de voláteis é obtido desde que sejam realizadas as análises de no mínimo duas amostras que não apresentem variação superior a 2%.

2.3.3 TEOR DE CINZAS

O teor de cinza é a quantidade de resíduo inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica, que é transformada em energia, gás carbônico e água (Barros, 2012). Segundo Fonseca Felfi, 2003, o teor de cinzas proporciona uma ideia da quantidade de escórias e/ou resíduo a ser retirada do forno.

A determinação do teor de cinzas de uma amostra consiste em através de uma balança analítica obter-se 1,0 g de amostra seca, colocá-la dentro de um cadinho seco com massa também obtida na balança analítica. Em seguida, o conjunto é levado à mufla previamente aquecida a 700 ± 10 °C e é deixado lá até que a amostra queime completamente.

Por fim, o cadinho com o restante da amostra é retirado da mufla, resfriado e sua massa aferida na balança analítica. Através dos dados obtidos, utiliza-se a seguinte equação:

$$TCZ = \frac{m_1 - m_0}{m} * 100 \quad (2.3)$$

Sendo TCZ o teor de cinzas da amostra [%], m_0 a massa do cadinho [g], m_1 a massa do restante da amostra somada à massa do cadinho [g] e m a massa da amostra [g]. O teor de cinzas é obtido desde que sejam realizadas no mínimo duas análises que não apresentem variação maior que 10%.

2.3.4 TEOR DE CARBONO FIXO

O teor de carbono fixo é a massa restante após as liberações de voláteis, excluindo as cinzas e teor de umidade (MCKENDRY, 2002).

O teor de carbono fixo, segundo a norma ABNT 8112/1986 pode ser calculado da seguinte forma:

$$TCF = 100 - (TCZ + TMV) \quad (2.4)$$

Sendo TCF o teor de carbono fixo da amostra [%], TCZ o teor de cinzas [%] e TMV o teor de materiais voláteis [%].

2.3.5 PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor pode ser definido como a menor temperatura necessária para que um composto gere quantidade suficiente de vapores inflamáveis diante da aplicação de uma chama em condições específicas. Apenas atingir essa propriedade não é o suficiente para que se mantenha a combustão. Seu valor depende do teor de hidrocarbonetos leves presentes no combustível (SMITH, 1923).

I. Implicações no transporte e armazenamento

Devido à definição do ponto de fulgor da amostra é possível compreender que para finais de transporte e armazenamento dos compostos essa propriedade tem papel fundamental para que sejam realizados com segurança, visando sempre trabalhar com temperaturas abaixo do ponto de fulgor da amostra.

3 METODOLOGIA

3.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Foram enviados ao laboratório de transferência de calor e massa (LTCM) cinco lotes de amostras desconhecidas, conforme apresentado nas Figuras 2 e 3.

Figura 2: Três compostos sólidos distintos de coloração escura: a) Amostra 1, b) Amostra 2, c) Amostra 3



Figura 3: Dois compostos sólidos distintos de coloração clara: a) Amostra 4, b) Amostra 5



Em seguida procedeu-se com os ensaios termogravimétricos e de calorimetria.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NO ANALISADOR TERMOGRAVIMÉTRICO: TGA-2000A

Trata-se de ensaios em um analisador termogravimétrico da marca Navas Instruments, Automatic Sample Thermogravimetric Analyzer TGA-2000A, conforme apresentado na Figura 4. Este equipamento segue a norma nacional ABNT NBR 8112/1996, norma que apresenta os requisitos e procedimentos para análise imediata tendo como referência o carvão mineral. No entanto, essa norma encontra-se em desuso, porém é a norma nacional mais atual para essa análise. Além disso, o equipamento segue a norma internacional ASTM E1131-08 que regulamenta a metodologia padrão para análise de composição por termogravimetria e está relacionada à norma 11358, porém mais detalhada e específica, como é descrita na própria norma.

Figura 4: TGA-2000A



Inicialmente, a máquina foi inicializada por meio de um software via computador. Para fins estatísticos, foram selecionados três cadinhos para cada tipo de amostra, totalizando 15 ensaios. Os cadinhos foram inseridos vazios no TGA com a adição de um cadinho extra, também vazio, como referência. Em seguida, após a máquina pesar cada recipiente, eles foram preenchidos com as amostras selecionadas, com exceção do cadinho referência que permaneceu vazio, e novamente o analisador pesou automaticamente cada amostra. A Figura 5 mostra os cadinhos posicionados no TGA.

Figura 5: TGA-2000A com amostras em fase de pesagem



Então, conforme apresentado na Figura 6, a máquina solicita que as tampas sejam adicionadas em todos os cadinhos e realiza a última pesagem e o experimento tem início.

Figura 6: TGA-2000A com amostras já tampadas, pronto para inicializar



Com o TGA-2000A inicializado deve-se determinar qual gás será utilizado para o teste de materiais voláteis, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7: Conexão dos gases com a máquina TGA-2000A

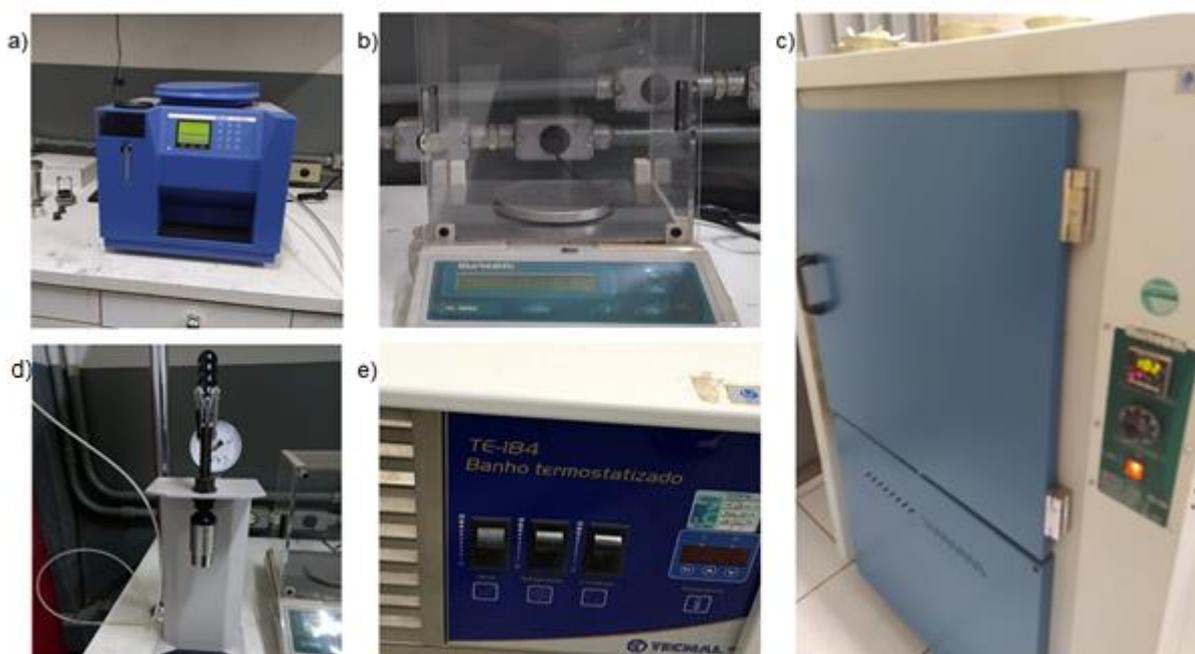


Para determinar o ponto de fulgor das amostras foram realizadas duas rodadas de ensaios no TGA. Na primeira, usou-se ar atmosférico que pode gerar a combustão dos gases voláteis, enquanto na segunda, usou-se um gás inerte (nitrogênio) eliminando a possibilidade de combustão. O ponto de fulgor foi determinado através da interseção das curvas de perda de massa por minuto em função da variação da temperatura entre as situações utilizando nitrogênio e ar atmosférico, obtidas através do tratamento dos resultados das análises da máquina TGA-2000A, conforme sugerido por Grotkjær et al, 2002.

3.3 CALORIMETRIA

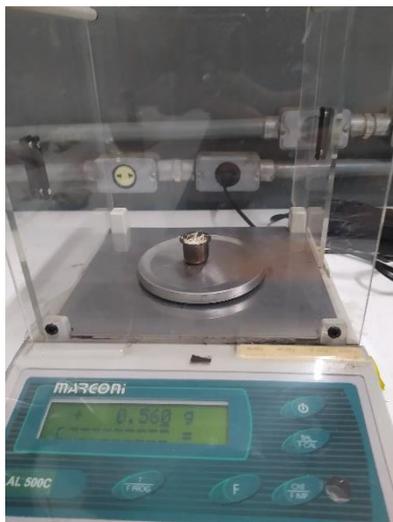
Para os ensaios de calorimetria foram utilizados os equipamentos apresentados na Figura 8, a saber: bomba calorimétrica IKA C 200; balança analítica com precisão de 0,1 mg; estufa capaz de atingir 110 °C; equipamento para pressurizar o cilindro da bomba calorimétrica com oxigênio puro; banho térmico.

Figura 8: a) bomba Calorimétrica IKA C 200; b) balança analítica com precisão de 0,1mg; c) estufa capaz de atingir 105°C; d) equipamento para pressurizar o cilindro da bomba calorimétrica com oxigênio puro; e) banho termostático.



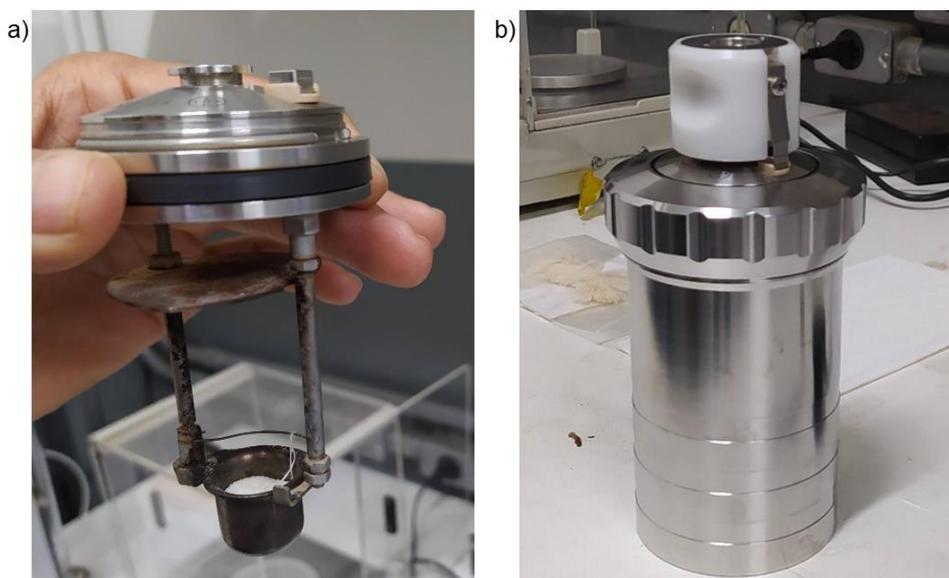
Conforme previsto na norma ABNT NBR 8633/1984, o ensaio na bomba calorimétrica deve ser realizado com as amostras secas. Portanto, inicialmente, as amostras foram colocadas para secar na estufa à 105 °C. Usando a balança de precisão o peso de cada amostra foi avaliado até que este se mantivesse constante. Com as amostras devidamente secas, iniciaram-se os testes no calorímetro. Faz-se primeiramente a tara de um cadinho vazio e em seguida este é preenchido com a amostra. Conforme visto na Figura 9, após a pesagem o valor é inserido no software do calorímetro.

Figura 9: Cadinho sendo pesado com amostra



Então o cadinho com amostra foi colocado suspenso em um recipiente com um fio de algodão, que por sua vez, está posicionado sobre uma resistência elétrica que irá fornecer o calor necessário para que ocorra a centelha e ignição da amostra, conforme pode ser visto na Figura 10a. O recipiente é lacrado e pressurizado com oxigênio a 30 bar, exemplificado na Figura 10b. Então ele é posicionado no interior da bomba calorimétrica. O reservatório desta é preenchido com água à 18 °C, oriunda de um banho térmico, e então realiza-se o experimento para determinar o poder calorífico superior (PCS) de cada amostra.

Figura 10: a) Cadinho inserido na estrutura em contato com o filamento e b) Recipiente contendo a amostra preparado para ser inserido na bomba calorimétrica



De acordo com a norma ABNT NBR 8633/1984 o poder calorífico superior (PCS) é determinado em uma bomba calorimétrica adiabática isotérmica, no caso a IKA C 200 com precisão de ± 20 J/g. Ele é obtido pela média do resultado de, no mínimo, duas amostras, com tolerância máxima de 120 J/g de diferença para testes realizados no mesmo laboratório.

O dado utilizado na indústria para avaliação de um combustível é o PCI, e para que ele seja obtido é necessário realizar o seguinte procedimento:

$$PCI_{B.S.} = PCS_{B.S.} - h_{lv} \left(9 * \frac{H}{100} \right) \quad (3.1)$$

sendo que $PCI_{B.S.}$ é o poder calorífico inferior na base seca (com o combustível já seco), $PCU_{B.S.}$ é o poder calorífico superior na mesma base, h_{lv} é a entalpia de vaporização da água a 20 °C e tem o valor de 586,16 [kcal/kg], equivalente ao valor de 2452,5 [kJ/kg] e H é o percentual médio de hidrogênio presente no material, considerado com 6 [%].

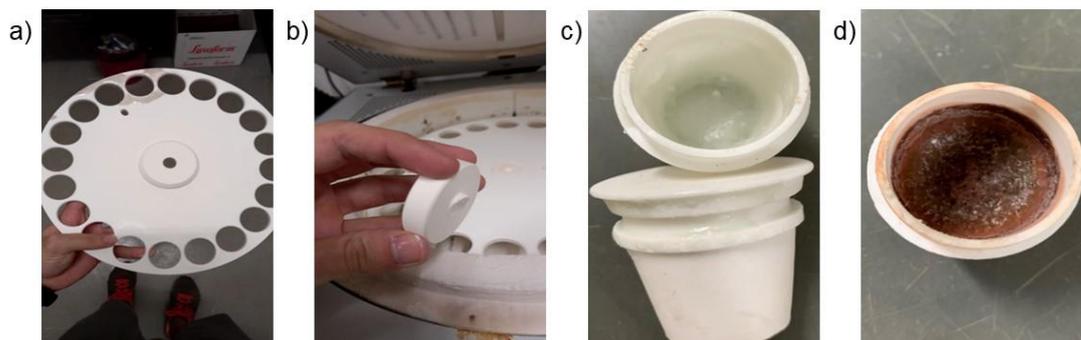
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia experimental aplicada aos compostos desejados, foram obtidos os resultados das análises térmicas.

4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Durante a realização dos experimentos no analisador TGA ocorreram alguns problemas graves. Devido às altas temperaturas no interior do equipamento (superior à 900°C), a amostra 5 se liquefez, transbordou do cadinho e se transformou em uma resina plástica. Em baixas temperaturas a resina acabou se transformando em uma cola extremamente resistente, colando os cadinhos às tampas e ao carrossel rotativo do analisador TGA, o que culminou na quebra do eixo rotativo do carrossel, conforme demonstrado na Figura 11. Algo semelhante aconteceu com a amostra 4, todavia esta não transbordou do cadinho. Logo, diante de tais problemas, não foi possível realizar as análises termogravimétricas das amostras 4 e 5. Após cerca de 2 semanas, foi feito o reparo do equipamento, substituindo o eixo central deste e lixando a cola que ficou aderida no carrossel. Os cadinhos e as tampas usadas na amostra 5 tiveram que ser descartados, visto que mesmo em uma mufla a aproximadamente 1000 °C a cola plástica não escoou ou evaporou dos recipientes.

Figura 11: Problema na análise termogravimétrica: a) Carrossel com resina; b) eixo central do TGA danificado; c) aspecto da amostra 5 e d) da amostra 4.



Logo, a Tabela 1 apresenta a análise termogravimétrica e o poder calorífico das amostras de 1 a 3.

Tabela 1: Comparativo entre os compostos analisados

Indicadores	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Umidade	14,16% ± 0,06%	18,95% ± 0,04%	8,07% ± 0,00%
Teor de Materiais Voláteis	72,32% ± 1,17%	42,75% ± 2,02%	40,85% ± 0,74%
Teor de Cinzas	9,42% ± 0,68%	30,66% ± 2,45%	50,98% ± 1,48%
Teor de Carbono Fixo	4,08% ± 0,55%	7,63% ± 0,37%	0,09% ± 2,23%
Poder Calorífico Inferior[kJ/kg]	10404,66 ± 7,74	12323,16 ± 491,49	4849,16 ± 251,55

Realizada a análise individual de cada uma das substâncias, foi possível traçar um comparativo entre os principais aspectos destas.

Em relação ao teor de umidade a Amostra 3 apresentou o menor percentual (8,07%), seguida pela Amostra 1 com 14,16% e a Amostra 2 com 18,95%. Em todos os casos o desvio padrão foi inferior a 0,06%, confirmando uma excelente repetibilidade nos experimentos.

Quanto ao teor de materiais voláteis, a substância com maior potencial para volatilização é a amostra 1, com 72,32% em média. Tanto a amostra 2 e a 3, possuem percentuais similares e menores que o composto anterior, 42,75 e 40,85,

respectivamente. Considerando o intervalo de confiança adotado, para uma confiabilidade de 99%, esses valores foram inferiores a 2,02%, denotando, mais uma vez, uma baixa variação nos resultados.

Comparando o teor de cinzas dos três substratos, é possível observar que o maior deles é apresentado pela substância 3, que compreende 50,98%, em média, de materiais inorgânicos em sua composição. Em segundo lugar está a amostra 2, com 30,66%, em média e em terceiro lugar a amostra 1 com 9,42%, sendo o menor valor. A maior variação foi apresentada pela amostra 3 sendo 2,45%, um valor pequeno, pois de acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986 essa variação deve ser inferior a 10%.

Ao analisar o teor de carbono fixo dos compostos, o maior percentual foi obtido para o substrato 2, 7,64% em média, seguido da amostra 1, com 4,08%. O menor valor obtido, foi para o composto 3, de 0,09%, porém com um intervalo de confiança maior, de $\pm 2,23\%$, que mostra certa variação nesse indicador em relação à sua magnitude.

Para o valor do PCI, que é realizado pela bomba calorimétrica IKA C 200 e corrigido de acordo com os cálculos apresentados no item 3.3. Em relação a esse aspecto, o substrato com maior poder calorífico é o 2, com 12323,16 [kJ/kg], seguido pelo 1 que apresenta um valor de 10404,66[kJ/kg] e por último o 3, com 4849,16[kJ/kg], denotando a influência dos aspectos comparados anteriormente, como teor de voláteis, cinzas e carbono fixo, no poder calorífico inferior das amostras em base seca. Em relação a confiabilidade, o maior intervalo apresentado foi de 491,94[kJ/kg] para a amostra 2, sendo um valor que representa 3,99% do valor total, portanto é uma variação que reafirma a excelente repetibilidade dos experimentos.

Por fim, com os resultados obtidos para cada composto, sendo que as três amostras apresentaram poder calorífico e geram calor no processo de combustão é possível afirmar que possuem teor de compostos orgânicos em suas composições. Além disso, segundo Chaves *et al*, 2013 as cinzas são substâncias compostas de material inorgânico e tem relação inversa com o poder calorífico, uma vez que as cinzas são o que sobra após a combustão de um produto, então pode-se ter uma boa noção da distribuição entre matéria orgânica e inorgânica nesses substratos. Assim, a amostra 1 apresenta o menor teor de cinzas, que representa o percentual de compostos inertes ao processo de combustão, compostos inorgânicos. Já a amostra

2, por sua vez apresenta um teor maior desse tipo de material, assim como a 3, que apresenta o maior valor.

No entanto, vista a diferença entre o poder calorífico das substâncias 2 e 3, temos a influência do teor de carbono fixo, uma vez que o teor de materiais voláteis dessas amostras é razoavelmente similar. Quanto ao percentual de materiais que são volatilizados no teste de análise termogravimétrica, representa a participação de compostos orgânicos na composição das amostras, sendo a 1, a que possui a maior quantidade desses.

4.2 ANÁLISE DE PCI

Além da análise térmica dos três compostos mencionados na Tabela 1, foi realizado um estudo comparativo entre outras amostras presentes no LTCM da Universidade Federal de Uberlândia.

Tabela 2: Comparativo entre o PCI das amostras analisadas

Composto	PCI [kJ/kg]	Desvio Padrão	Intervalo para Confiabilidade 99%
Bagaço de Cana	16084,16	106,77	16084,16 ± 194,79
0,58 g Bagaço de Cana + 0,51 g Amostra 4	7857,66	456,79	7857,66 ± 833,34
0,52 g Bagaço de Cana + 0,55 g Amostra 5	7022,66	77,78	7022,66 ± 141,90
Bagaço de Cana 2	15927,41	203,25	15927,41 ± 214,08
Amostra 1	10404,66	4,24	10404,66 ± 7,74
Amostra 2	12323,16	269,41	12323,16 ± 491,49
Amostra 3	4849,16	137,88	4849,16 ± 251,55

As amostras presentes na Tabela 2 foram selecionadas por motivos específicos para gerar uma base de comparação para os compostos analisados no presente trabalho.

O bagaço de cana-de-açúcar foi escolhido para servir de base para validação dos testes e como parâmetro, pois é uma substância conhecida, com potencial energético amplamente estudado. Além disso, foi utilizado para verificar a composição das amostras tendo como base o poder calorífico.

As amostras 4 e 5 não possuem capacidade de produzir calor, pois na bomba calorimétrica não foi medido nenhum valor para o PCI destas. Sendo adicionados junto ao bagaço e comparados os PCI em relação a proporção de massa adotada foi possível confirmar mais uma vez que essas amostras não entram em combustão, assim se qualificando como compostos inorgânicos, podendo ser equiparados as cinzas, o material que resta após a combustão de biomassas, segundo Livingston, 2007.

A amostra Bagaço de cana 2, foi uma média realizada entre a o Bagaço de cana e os outros dois testes com presença das amostras 4 e 5, retirando a influência da massa destes no processo, considerando apenas o PCI do próprio bagaço de cana-de-açúcar.

Com isso, foram analisados os valores para o PCI do Bagaço de cana e os resultados foram satisfatórios e condizentes com outros trabalhos de referência, como o do acadêmico (ARANTES, 2014), que obteve o valor de 17575,98 [kJ/kg], considerando algumas diferenças na matéria bruta utilizada, uma vez que utilizando biomassas diferentes é extremamente difícil garantir a mesma composição.

Validados os testes, foi feita a comparação entre as três amostras analisadas neste trabalho em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, considerado uma biomassa nobre para a geração de energia.

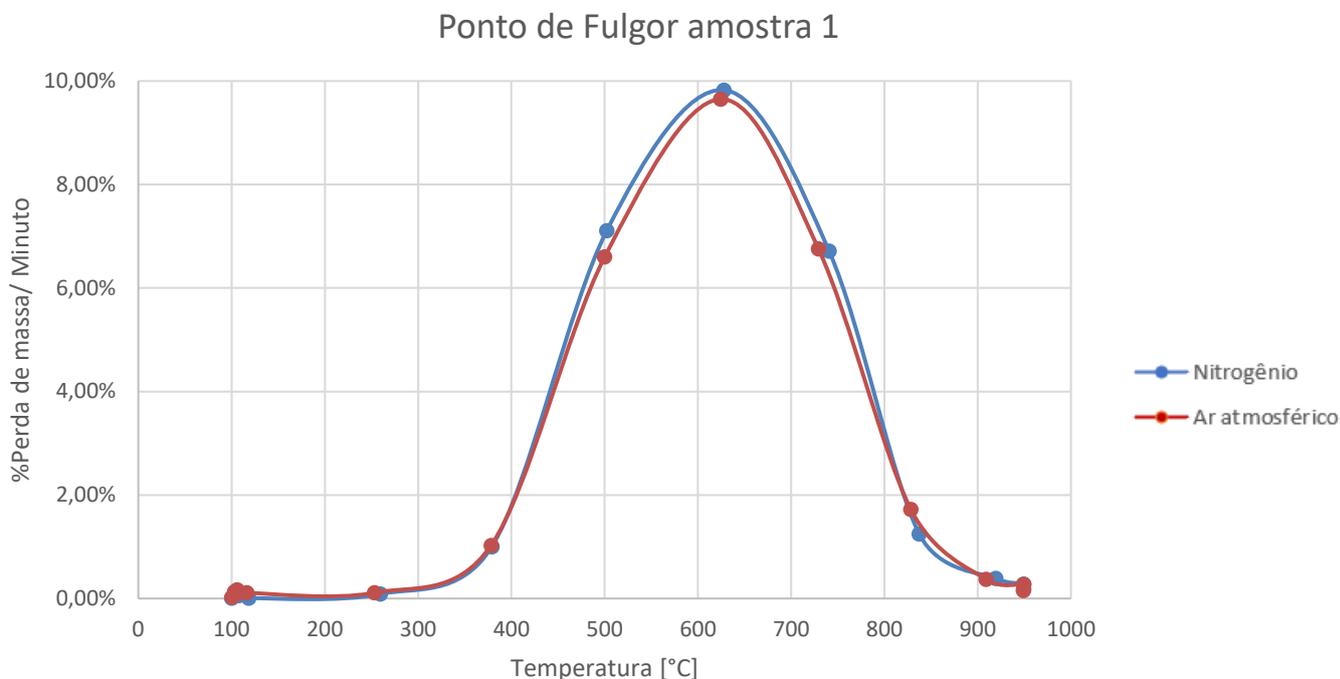
Sendo assim, os compostos 2 e 1, devido à magnitude do poder calorífico, podem ser compreendidos como biomassas, uma vez que segundo a ANEEL, 2008, qualquer matéria orgânica que pode vir a se transformar em energia térmica, mecânica ou elétrica é considerada biomassa. Isso também ocorre para o substrato 3, porém pela grande quantidade de material inorgânico, apresenta o menor poder calorífico.

4.3 PONTO DE FULGOR

Com o resultado do decaimento de massa das amostras 1 e 2, as mais relevantes para a geração de energia, foi realizado o estudo do Ponto de Fulgor

destas, tendo um papel fundamental no transporte e armazenamento dessas substâncias.

Figura 12 - Ponto de Fulgor amostra 1

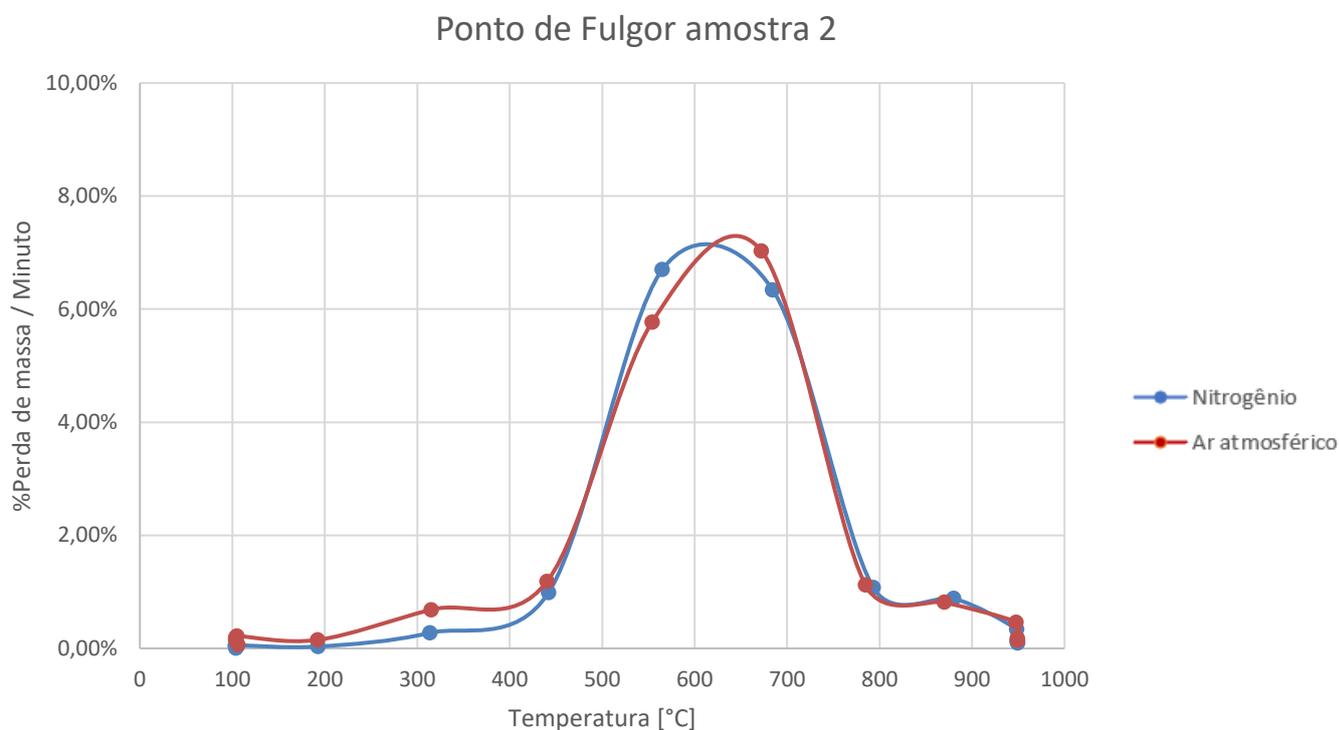


A partir das curvas da taxa de perda de massa por minuto em função da temperatura na presença dos gases Nitrogênio e Oxigênio, é possível determinar o ponto de fulgor da amostra.

Com isso, observou-se que durante o aumento da taxa de perda de massa por minuto a discrepância entre as curvas ocorre entre as temperaturas de 420°C e 450°C, o que implica em um cuidado no transporte dessa substância ao atingir temperaturas próximas a essas.

No entanto, o ponto de fulgor para esse composto é relativamente alto, sendo um ponto positivo para o transporte e armazenamento, que pode ser feito com menos restrições uma vez que não há o risco de grande perda de massa nem de ignição espontânea até temperaturas de aproximadamente 420°C.

Figura 13 - Ponto de Fulgor amostra 2



Para a amostra 2, esse ponto ocorre a partir de aproximadamente 200°C, sendo essa uma temperatura que demanda um cuidado maior no transporte e menor quanto ao armazenamento, desde que em local abrigado. Isso se deve à exposição à radiação solar que pode ocorrer no deslocamento desse composto de sua origem ao destino final.

Devido a isso, a amostra 1 apresenta melhor comportamento em relação à perda de massa com o aumento da temperatura, apresentando menos riscos em relação a transporte e estoque, já a 2, denota um comportamento mais volátil em comparação ao composto anterior, todavia não representa um grande risco a esses.

Se tratando do armazenamento de ambas as substâncias, um cuidado que se deve ter é sobre a umidade do local em que serão mantidas, pois elevando a umidade destas, as propriedades dos compostos podem ser prejudicadas.

5 CONCLUSÃO

As três etapas deste trabalho se resumiram em realizar o tratamento da biomassa recebida no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para a realização dos experimentos. Em

seguida foram realizados os testes de calorimetria e a análise termogravimétrica, que consiste na análise térmica dos compostos. Por fim, foram tratados os resultados obtidos e organizados de forma que fosse possível realizar a avaliação da composição das amostras e defini-las de acordo com a literatura.

O tema foi selecionado com o intuito de evidenciar a importância da realização da análise térmica de compostos orgânicos para identificação de substâncias e possibilitar estudos futuros da viabilidade destes no uso para geração de energia, assim como a necessidade e os benefícios do reaproveitamento de biomassa.

Os resultados obtidos foram comparados com teses já realizadas para a validação da metodologia e garantia de valores condizentes para uma análise efetiva.

Através da análise imediata dos compostos avaliados no presente trabalho, foram obtidos valores para o teor de umidade que variaram entre 8,07% a 18,95%. Para o percentual de matérias voláteis, a variação entre as substâncias se mostrou maior, indo de 40,85% a 72,32%, assim como o teor de cinzas, oscilando de 9,42% a 50,98%. O percentual de carbono fixo, por sua vez variou de 0,08% a 7,64% nos diferentes compostos. Com esses dados foi possível perceber o potencial da amostra 1 para extração de gases combustíveis em processos de gaseificação e pirólise, enquanto a 2 e a 3, não se apresentaram tão promissoras.

A partir dos ensaios de calorimetria para os compostos principais, os resultados para o Poder Calorífico Inferior, variaram de 4849,16[kJ/kg] a 12323,16[kJ/kg]. Após isso, foram comparados com os resultados da literatura e o mesmo teste realizado para o bagaço de cana-de-açúcar. Através dessa base, foi possível não só comparar os compostos entre si, mas fazer um paralelo com uma biomassa conhecida para comprovar as hipóteses levantadas quanto à composição das amostras.

Combinando os dois tipos de avaliação, chegou-se à conclusão que as amostras 1,2 e 3 se tratam de biomassas, enquanto as amostras 4 e 5 são compostos inorgânicos. No entanto, mesmo entre as amostras 1,2 e 3 é possível detectar em suas composições a presença de materiais inorgânicos, sendo menor na substância 1, seguida pela 2 e por último a amostra 3. Isso reflete diretamente na magnitude do poder calorífico, juntamente com o teor de materiais voláteis e carbono fixo.

Partindo da conclusão acima, foi estudado o ponto de fulgor desses compostos para avaliar os aspectos relacionados a transporte e armazenamento. Diante disso,

foi possível determinar que o substrato 1 apresenta uma temperatura de risco mais alta, aproximadamente 420°C, que o 2, em torno de 200°C, em relação ao aumento da taxa de perda de massa na presença de ar atmosférico, que pode implicar em custos menores para realocá-la em segurança. No entanto, é importante ressaltar que ambos compostos devem ser armazenados em local seco para que as propriedades térmicas não sejam prejudicadas, pois em um local úmido, pode ocorrer o aumento do teor de umidade e redução do poder calorífico devido aos gastos com a volatilização da água.

Em seguida, são apresentadas as seguintes propostas para possíveis trabalhos que possam dar continuidade a este:

- a) Estudo comparativo da viabilidade energética dos compostos analisados;
- b) Estudo da viabilidade econômica para a produção de energia através dos compostos estudados em um sistema definido, como queima em caldeiras;
- c) Estudo dos materiais voláteis obtidos através de pirólise seguida de cromatografia para identificação dos subprodutos gerados e seu potencial energético;
- d) Realizar um estudo comparativo sobre a combustão dos produtos secos e *in natura* para avaliar as perdas de energia em relação ao custo para a secagem das amostras;
- e) Realizar análises sobre a densidade energética dos compostos e a viabilidade para a utilização em diferentes formas, como compactação precedendo a queima.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, D. C. **BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR: ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA**. 2014. 99P. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ATKINS, P. W.; JONES, L. L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre, Bookman, 2001.

BARROS, L. O. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos**. Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Disponível em: <www.aneel.gov.br> Acessado em: 20 de fevereiro de 2022.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Usos diretos e propriedades da madeira para CHAVES, Antonio et al. Características Energéticas Da Madeira E Carvão Vegetal De Clones De Eucalyptus Spp**. Enciclopédia biosfera, v. 9, n. 17, 2013.

CIAMPI, G. J. S.; **Desenvolvimento de um Calorímetro para a Determinação do Conteúdo Energético de Combustíveis Sólidos**. 1992. 84 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Campinas, Campinas.

COSENTINO, M. R.; RIOS, L. **Experimentos de Calorimetria em Cursos Universitários**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, 2019.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: IQSC, p. 40, 2012.

FONSECA FELFI, FELIX ELIECER. **Torrefação de Biomassa, Viabilidade Técnica e Potencial de Mercado**. [s.n.], 2003. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

geração de energia. IPEF, São Paulo, Circular Técnica, n.52, PBP/3.1.8, 7p. jun. 1979

GROTKJÆR, T.; DAM-JOHANSEN, K.; JENSEN, A. D.; GLARBORG, P. **An experimental study of biomass ignition**. Lyngby, 2002.

IONASHIRO, M. **Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial**. Araraquara, SP, 2004.

LIVINGSTON, W.; 2007. **Biomass ash characteristics and behaviour in combustion, gasification and pyrolysis systems**. Doosan Babcock Energy Limited (ed.), February.

MCKENDRY, P.; **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciências, 2003

OLIVEIRA, S. V. W.; FERREIRA, A. H.; OLIVEIRA, M. M. B.; **Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente-ENGEMA, 2016.

PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN, K.S.; AROCKIAM, L. **Study on kinetic parameters of different biomass samples using thermo-gravimetric analysis**. Biomass Bioenerg. 2013.

PAULIK, F.; PAULIK, J.; ERDEY, L. **Der Derivatograph**. Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie, v. 160, n. 4, p. 241-252, 1958.

PEREIRA, R. A.; **ESTIMACÃO DE ENERGIA EM UM CALORÍMETRO FINAMENTE SEGMENTADO**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PESSOA FILHO, J.S. **ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE CAPIM BRAQUIÁRIA**. 2013. 83p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PRENTICE, A.; **Le symposium Lavoisier**. Proc. Nutr. Soc, v. 54, p. 1-8, 1995.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S.; **Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos**. *Revista Biomassa & Energia*, v.1, n.2, p. 173-182, 2004.

ROQUE, N. F. **Substâncias Orgânicas: Estrutura e Propriedades**. São Paulo. Edusp, 2011.

SMITH, M.; MARION, L., 1923. Fuels and combustion. 1st Ed. New York: McGraw-Hill book company, 1952.

TAKESHITA, S.; JÚNIOR, A. F. D.; **Guia prático de instalação e utilização de Bomba Calorimétrica modelo Ika C200**, 2017.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

WENDLANDT, W. W. **Thermal Analysis**. Toronto: John Wilwy & Sons, 1986.

ZUIM, B. B. **Reaproveitamento Energético dos Refugos Industriais do Processo de Rotomoldagem a partir da Gaseificação**. 2013. 140p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos/SP, Brasil.