



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Felipe Bicalho Azeredo da Silva

**Avaliação das propriedades mecânicas e de estabilidade de
briquetes lignocelulósicos**

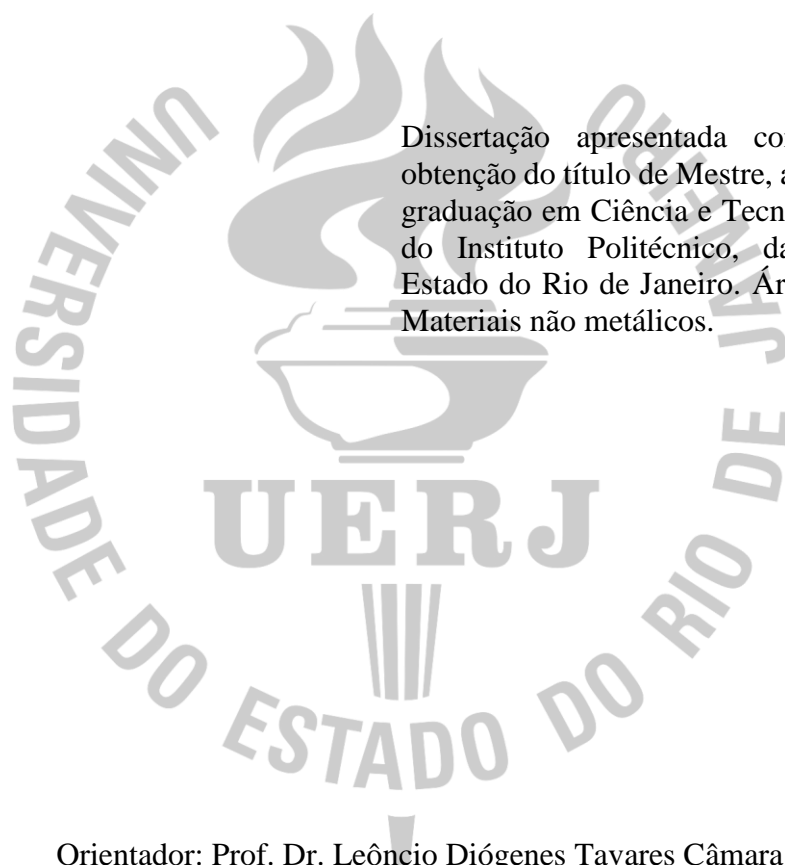
Nova Friburgo

2017

Felipe Bicalho Azeredo da Silva

Avaliação das propriedades mecânicas e de estabilidade de briquetes lignocelulósicos

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais não metálicos.



Orientador: Prof. Dr. Leôncio Diógenes Tavares Câmara

Nova Friburgo

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

S586 Silva, Felipe Bicalho Azeredo da.
Avaliação das propriedades mecânicas e de estabilidade
de briquetes lignocelulósicos / Felipe Bicalho Azeredo da
Silva. - 2017.
93 f.: il.

Orientador: Leôncio Diógenes Tavares Câmara.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Briquetes – Teses. 2. Resíduos como combustível –
Teses. 3. Propriedades térmicas – Teses. 4. Propriedades
mecânicas – Teses. I. Câmara, Leôncio Diógenes Tavares. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto
Politécnico. III. Título.

CDU 662.818

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Felipe Bicalho Azeredo da Silva

Data

Felipe Bicalho Azeredo da Silva

Avaliação das propriedades mecânicas e de estabilidade de briquetes lignocelulósicos

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Aprovado em 17 de março de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leôncio Diógenes Tavares Câmara (Orientador)
Instituto Politécnico do Rio de Janeiro - UERJ

Prof^a. Dr^a. Mônica Calixto de Andrade
Instituto Politécnico do Rio de Janeiro - UERJ

Prof. Dr. Amaro Gomes Barreto Junior
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Nova Friburgo

2017

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais e a minha irmã, que são a principal causa da inspiração para tanto, e a todos os meus amigos e professores que sempre me apoiaram e deram forças para que eu prosseguisse com o meu crescimento profissional e como ser humano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Carlos Alexandre Freitas da Silva e Saionara Bicalho Azeredo da Silva por sempre me darem amor e serem compreensivos, além do árduo trabalho que ambos tiveram para me dar suporte financeiro, possibilitando que eu pudesse me dedicar inteiramente aos estudos durante minha formação. E principalmente por ensinarem a mim e a minha irmã, Renata Bicalho Azeredo da Silva, o que há além dos livros e das salas de aula.

Agradeço a todas as pessoas com as quais fiz amizade durante meu tempo de pós-graduação, principalmente ao meu amigo Philipe Lopes Jurge Tardin.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Leôncio Diógenes Tavares Câmara.

Enfim, agradeço a todos os professores e funcionários do IPRJ por terem me dado conhecimento e suporte para meu crescimento como Engenheiro Mecânico.

A maioria das grandes descobertas foram resultado de 99% de trabalho duro e só 1% de genialidade.

Thomas Edison

RESUMO

SILVA, Felipe Bicalho Azeredo da. *Avaliação das propriedades mecânicas e de estabilidade de briquetes lignocelulósicos*. 2017. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

A briquetagem é uma técnica que consiste em compactar e aglutinar resíduos orgânicos em briquetes para serem usados como lenha ecológica ou verde. Atualmente, esta técnica está sendo amplamente difundida no Brasil e no mundo, pelo fato de a matéria prima utilizada ser de baixo ou nenhum custo e seus produtos, os briquetes, terem características muito mais vantajosas do que as lenhas oriundas das madeiras de lei. Este trabalho visa caracterizar através de diversas técnicas destrutivas e não destrutivas as principais propriedades de um briquete lignocelulósico. O mesmo é constituído de duas etapas. A primeira é a comparação das propriedades térmicas, de queima e de estabilidade de briquetes comerciais, da lenha de eucalipto e dos briquetes produzidos através da técnica de briquetagem por batelada hermética, desenvolvida pelo autor durante seu trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica. A segunda etapa diz respeito à avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, de queima e de estabilidade de novos briquetes produzidos de forma padronizada. As propriedades estudadas têm como função determinar o grau de qualidade que os briquetes produzidos pela nova técnica de briquetagem possuem em comparação com outros combustíveis de biomassa. Conclui-se assim que os briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética possuem nas propriedades fundamentais para um combustível de biomassa um grau de qualidade igual ou superior.

Palavras-Chave: Briquetagem. Briquete. Lenha ecológica. Batelada hermética. Propriedade mecânica. Propriedade térmica. Propriedade de queima. Estabilidade. Briquetes comerciais. Lenha de eucalipto. Briquetes padronizados.

ABSTRACT

SILVA, Felipe Bicalho Azeredo da. *Evaluation of mechanical properties and stability of lignocellulosic briquettes*. 2017. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

Briquetting is a technique of compressing and agglutinating organic wastes into briquettes to be used as environmental friendly fuelwood. Currently, this technique is being spread worldwide, due to the low-to-no cost of the raw material used and the much more favorable characteristics its products, the briquettes, presents when compared to those made with firewood originated from hardwoods. This study aims to characterize through several destructive and non destructive techniques the main properties of a lignocellulosic briquette and it consists of two phases. The first one is the comparison of the thermal, burning and stability properties of commercial briquettes, eucalyptus fuel wood and the briquettes produced using the technique of hermetic batch briquetting which were conceived by the author in his course conclusion paper for the undergraduate course in Mechanical Engineering. The second phase concerns the evaluation of mechanical, thermal, burning and stability properties of new briquettes produced following a standardization process. The properties studied have the function of determining the degree of quality that the briquettes produced by the new briquetting technique have in comparison with other biomass fuels. It can be concluded that the briquettes produced by the hermetic batching briquetting technique have the same or higher quality of properties as biomass fuel.

Keywords: Briquetting. Briquette. Ecological fuel wood. Hermetic batch. Mechanical property.

Thermal property. Burning property. Stability. Commercial briquettes. Eucalyptus fuel wood. Standardized briquettes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre a lenha e o briquete comercial.....	17
Figura 2 - Briquetes produzidos na graduação.....	18
Figura 3 - Reator de briquetagem por batelada hermética - versão 2014.....	18
Figura 4 - Briquete Tramontina.....	23
Figura 5 - Lenha de eucalipto.....	23
Figura 6 - Amostras da análise de espectroscopia por raios-x.....	26
Figura 7 - Gerador de raios-x e detector SDD.....	26
Figura 8 - Amostras da análise de teor de cinzas.....	30
Figura 9 - Balança de precisão Martes Série AS5500C.....	31
Figura 10 - Forno de resistências JUNG modelo 7012.....	31
Figura 11 - Cinzas obtidas.....	33
Figura 12 - Analisador térmico PerkinElmer STA 6000.....	34
Figura 13 - Granulometria das amostras utilizadas na análise térmica.....	35
Figura 14 - Aspecto dos cadinhos.....	44
Figura 15 - Cinzas da análise de composição por queima.....	44
Figura 16 - Analisador de infravermelho PerkinElmer FT-IR Frontier.....	46
Figura 17 - O corpo do novo reator.....	54
Figura 18 - A base do novo reator.....	55
Figura 19 - O pistão/êmbolo do novo reator.....	56
Figura 20 - Reator de briquetagem por batelada hermética - versão 2016.....	56
Figura 21 - Resíduos lignocelulósicos utilizados na briquetagem.....	57
Figura 22 - Prensa hidráulica manual Eureka 0195.....	58
Figura 23 - Forno de resistências JUNG modelo JC10013.....	58
Figura 24 - Capela química.....	59
Figura 25 - Briquetes padronizados produzidos.....	60
Figura 26 - Prensa eletrohidráulica SOLOTESTE modelo 1.501.220.....	62
Figura 27 - Características dos briquetes padronizados após a análise mecânica.....	64
Figura 28 - Aspecto das amostras utilizadas.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do briquete produzido no teste 3.....	24
Tabela 2 - Características do briquete produzido no teste 4.....	24
Tabela 3 - Características do briquete produzido no teste 11.....	25
Tabela 4 - Dados da análise de teor de cinzas.....	32
Tabela 5 - Dados da análise térmica do briquete Tramontina.....	36
Tabela 6 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 4.....	37
Tabela 7 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 11.....	37
Tabela 8 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 3.....	38
Tabela 9 - Dados da análise térmica da lenha de eucalipto.....	38
Tabela 10 - Estimativa de propriedades das amostras.....	39
Tabela 11 - Dados da análise de composição por queima.....	42
Tabela 12 - Picos das curvas do briquete Tramontina.....	47
Tabela 13 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 4.....	48
Tabela 14 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 11.....	49
Tabela 15 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 3.....	50
Tabela 16 - Picos das curvas da lenha de eucalipto.....	51
Tabela 17 - Componentes da mistura dos briquetes padronizados.....	61
Tabela 18 - Características gerais dos briquetes padronizados.....	61
Tabela 19 - Dados da análise mecânica de compressão axial.....	63
Tabela 20 - Dados da análise térmica dos briquetes padronizados.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados na face lateral do briquete Tramontina.....	27
Gráfico 2 - Resultados na face transversal do briquete Tramontina.....	28
Gráfico 3 - Resultados na face lateral do briquete produzido no teste 4.....	28
Gráfico 4 - Resultados na face transversal do briquete produzido no teste 4.....	29
Gráfico 5 - Percentual de cinzas.....	33
Gráfico 6 - Percentual de umidade das amostras.....	42
Gráfico 7 - Variação de massa.....	43
Gráfico 8 - Percentual de composição das amostras.....	43
Gráfico 9 - Curvas do briquete Tramontina.....	47
Gráfico 10 - Curvas do briquete produzido no teste 4.....	48
Gráfico 11 - Curvas do briquete produzido no teste 11.....	49
Gráfico 12 - Curvas do briquete produzido no teste 3.....	50
Gráfico 13 - Curvas da lenha de eucalipto.....	51
Gráfico 14 - Curvas de TG e DTG da média dos resultados.....	67
Gráfico 15 - Curvas de TG e DSC da média dos resultados.....	67
Gráfico 16 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-Triagem.....	75
Gráfico 17 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-Triagem.....	75
Gráfico 18 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-A.....	75
Gráfico 19 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-A.....	76
Gráfico 20 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-B.....	76
Gráfico 21 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-B.....	76
Gráfico 22 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-C.....	77
Gráfico 23 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-C.....	77
Gráfico 24 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-D.....	77
Gráfico 25 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-D.....	78
Gráfico 26 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-Triagem.....	78
Gráfico 27 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-Triagem.....	78
Gráfico 28 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-A.....	79
Gráfico 29 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-A.....	79
Gráfico 30 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-B.....	79

Gráfico 31 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-B.....	80
Gráfico 32 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-C.....	80
Gráfico 33 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-C.....	80
Gráfico 34 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-D.....	81
Gráfico 35 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-D.....	81
Gráfico 36 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-Triagem.....	81
Gráfico 37 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-Triagem.....	82
Gráfico 38 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-A.....	82
Gráfico 39 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-A.....	82
Gráfico 40 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-B.....	83
Gráfico 41 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-B.....	83
Gráfico 42 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-C.....	83
Gráfico 43 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-C.....	84
Gráfico 44 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-D.....	84
Gráfico 45 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-D.....	84
Gráfico 46 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-Triagem.....	85
Gráfico 47 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-Triagem.....	85
Gráfico 48 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-A.....	85
Gráfico 49 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-A.....	86
Gráfico 50 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-B.....	86
Gráfico 51 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-B.....	86
Gráfico 52 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-C.....	87
Gráfico 53 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-C.....	87
Gráfico 54 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-D.....	87
Gráfico 55 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-D.....	88
Gráfico 56 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-Triagem.....	88
Gráfico 57 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-Triagem.....	88
Gráfico 58 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-A.....	89
Gráfico 59 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-A.....	89
Gráfico 60 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-B.....	89
Gráfico 61 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-B.....	90
Gráfico 62 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-C.....	90
Gráfico 63 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-C.....	90

Gráfico 64 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-D.....	91
Gráfico 65 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-D.....	91
Gráfico 66 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste C.....	92
Gráfico 67 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste C.....	92
Gráfico 68 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste E.....	92
Gráfico 69 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste E.....	93
Gráfico 70 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste F.....	93
Gráfico 71 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste F.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ASTM	American Society for Testing and Materials
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
TG	Análise Termogravimétrica
DTG	Análise Termogravimétrica Derivativa
DSC	Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	16
	OBJETIVO.....	19
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
1.1	Pesquisa bibliográfica.....	20
1.2	A técnica de briquetagem por batelada hermética.....	21
1.3	Cálculos e geração de gráficos.....	22
2	PRIMEIRA ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO.....	23
2.1	Análise de espectroscopia por raios-x.....	25
2.1.1	<u>Materiais utilizados.....</u>	26
2.1.2	<u>Métodos.....</u>	27
2.1.3	<u>Dados e resultados.....</u>	27
2.1.4	<u>Observações.....</u>	29
2.2	Análise de teor de cinzas.....	30
2.2.1	<u>Materiais utilizados.....</u>	30
2.2.2	<u>Métodos.....</u>	31
2.2.3	<u>Dados e resultados.....</u>	32
2.2.4	<u>Observações.....</u>	34
2.3	Análise térmica.....	34
2.3.1	<u>Materiais utilizados.....</u>	34
2.3.2	<u>Métodos.....</u>	35
2.3.3	<u>Dados e resultados.....</u>	36
2.3.4	<u>Observações.....</u>	39
2.4	Análise de composição por queima.....	40
2.4.1	<u>Materiais utilizados.....</u>	40
2.4.2	<u>Métodos.....</u>	40
2.4.3	<u>Dados e resultados.....</u>	41
2.4.4	<u>Observações.....</u>	45
2.5	Análise por infravermelho.....	45
2.5.1	<u>Materiais utilizados.....</u>	46
2.5.2	<u>Métodos.....</u>	46

2.5.3	<u>Dados e resultados</u>	47
2.5.4	<u>Observações</u>	52
2.6	Observações finais da primeira etapa de caracterização	52
3	O NOVO REATOR DESENVOLVIDO	53
3.1	O corpo do reator	54
3.2	A base do reator	54
3.3	O pistão/êmbolo do reator	55
3.4	Observações	56
4	PRODUÇÃO DE BRIQUETES PADRONIZADOS	57
4.1	Materiais utilizados	57
4.2	Métodos	59
4.3	Dados e resultados	60
4.4	Observações	61
5	SEGUNDA ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO	62
5.1	Análise mecânica	62
5.1.1	<u>Materiais utilizados</u>	62
5.1.2	<u>Métodos</u>	63
5.1.3	<u>Dados e resultados</u>	63
5.1.4	<u>Observações</u>	64
5.2	Análise térmica	65
5.2.1	<u>Materiais utilizados</u>	65
5.2.2	<u>Métodos</u>	65
5.2.3	<u>Dados e resultados</u>	66
5.2.4	<u>Observações</u>	68
5.3	Observações finais da segunda etapa de caracterização	68
	CONCLUSÃO	69
	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A - Gráficos da análise térmica da primeira etapa de caracterização.....	75
	APÊNDICE B - Gráficos da análise térmica da segunda etapa de caracterização.....	92

INTRODUÇÃO

A briquetagem é uma técnica que tem a finalidade de reciclar resíduos, principalmente, orgânicos para serem utilizados como lenha ecológica, também conhecida como briquete. Os principais resíduos orgânicos reciclados para produção dos briquetes são os resíduos de madeira, resíduos de culturas agrícolas e outros resíduos lignocelulósicos. Para produção dos briquetes, tais resíduos são compactados e aglutinados através de elevadas pressões e temperaturas, para plastificação da lignina contida dentro dos mesmos, atuando assim como um agente aglomerante das partículas.

A lignina é uma macromolécula tridimensional amorfa que se encontra em plantas e está associada à celulose na parede celular, cuja função é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. Devido à presença do grupo funcional álcool em sua estrutura molecular, a mesma possui facilidade em se dissolver na água.

Nos modelos de briquetagens comerciais, é necessário que os resíduos orgânicos estejam dentro de uma faixa granulométrica ideal para serem processados pela máquina de briquetagem, máquina esta, que aplica sobre o material elevadas pressões e temperaturas em sistema de extrusão ou extrusão RAM (extrusão acionada por um pistão hidráulico) para produzir os briquetes. Sistemas de extrusão estes, que consomem uma alta quantidade de energia para manter as elevadas pressões e temperaturas na operação do equipamento.

Os sistemas de extrusão e extrusão RAM consistem em um processo mecânico de produção de forma semicontínua em que o material é forçado através de uma matriz, por um parafuso ou pistão respectivamente, adquirindo assim a forma pré-determinada pela matriz. No processo de briquetagem, estes sistemas são utilizados para produzir briquetes com características distintas. Briquetes produzidos pelo sistema de extrusão são menores e possuem furos no seu centro, além de possuírem perfis cilíndricos. Já os briquetes produzidos pelo sistema de extrusão RAM são maiores e podem possuir diversos tipos de perfis.

Outra técnica que é capaz de produzir lenhas ecológicas semelhantes aos briquetes é a peletização, técnica esta, que produz péletes, produtos com densidade e dimensões menores que as de um briquete.

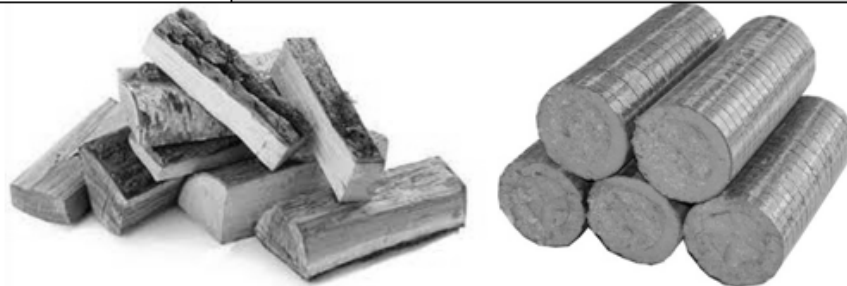
Além da briquetagem de resíduos orgânicos, também existe a briquetagem de resíduos de carvão e de limalhas de metais, briquetagens estas, usadas em menor percentual do que a de resíduos orgânicos verdes.

Para a padronização de algumas características dos briquetes, foi regulamentado pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) que um briquete deve ter uma densidade média entre 650,0 kg/m³ (0,65 g/cm³) e 1200,0 kg/m³ (1,2 g/cm³) e dimensões mínimas aproximadas de 60,0 mm de diâmetro e entre 25,0 mm e 300,0 mm de comprimento.

As principais características dos briquetes comerciais que demonstram suas vantagens de uso em relação à lenha convencional são descritas na figura 1:

Figura 1 - Comparação entre a lenha e o briquete comercial

Características	Lenha	Briquete
Poder calorífico	Baixo, 1700 - 2500 kcal/kg	Alto, 4000 - 4800 kcal/kg
Umidade	Alta, 20-45%	Baixa, 8-12%
Rendimento	Irregularidade térmica e baixa uniformidade da chama	Regularidade térmica e alta uniformidade da chama
Resíduos de cinzas, fuligem ou fumaça	Alto volume	Baixo volume
Manuseio	Difícil, por não existir uniformidade	Fácil, por ser padronizado
Armazenamento	Ocupa grande espaço	Ocupa pequeno espaço
Higiene e limpeza	Sujeira, umidade, insetos e contaminação	Limpos, secos, sem insetos e contaminação
Licença ambiental	Necessidade de licenciamento (com taxas)	Sem fiscalização (sem taxas)
Comercialização	Por m ³ (impreciso)	Por peso (exato)



Fonte: O autor, 2014.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram coletados uma lenha de eucalipto e resíduos de madeira, em granulometria de pó, serragem e raspas em serrarias da região do município de Nova Friburgo. Além dos resíduos orgânicos coletados, foi realizada a compra de uma caixa de briquetes comerciais da marca Tramontina, cuja produção é feita pela técnica de extrusão RAM. Também foram utilizados na primeira etapa de caracterização deste trabalho três dos quinze briquetes produzidos durante a graduação.

As características de todos os briquetes produzidos na graduação durante a fase de desenvolvimento da nova técnica de briquetagem, podem ser observadas na figura 2:

Figura 2 - Briquetes produzidos na graduação



Fonte: O autor, 2014.

Pode-se observar pela figura 2 que a técnica desenvolvida de briquetagem por batelada hermética é capaz de produzir vários tipos de briquetes com características diversas, possibilitando assim a produção de briquetes que podem gerar uma alta liberação de energia em pouco tempo de queima ou uma lenta queima com geração de brasas.

O reator de briquetagem por batelada hermética que foi construído na graduação e utilizado para o desenvolvimento da técnica de briquetagem por batelada hermética, pode ser observado na figura 3:

Figura 3 - Reator de briquetagem por batelada hermética - versão 2014



Fonte: O autor, 2014.

Para a continuidade deste trabalho foi elaborado e construído um novo reator de briquetagem por batelada hermética, que corrige algumas características do modelo antigo, a fim de melhorar a usabilidade do equipamento e produzir novos briquetes com composição de mistura padronizada. Estes novos briquetes foram utilizados principalmente nos ensaios mecânicos da segunda etapa deste trabalho por serem produzidos com dimensões que estão de acordo com as normas para ensaios com a madeira e outros materiais, facilitando assim a comparação de suas propriedades com a literatura.

OBJETIVO

Este trabalho teve como finalidade caracterizar as propriedades mecânicas, térmicas, de queima e de estabilidade de briquetes, que são produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, em comparação com briquetes comerciais e a lenha de eucalipto. Para tal, foram realizadas análises em duas etapas de caracterização com ensaios não destrutivos e destrutivos das amostras preparadas dos materiais citados. Sendo a primeira etapa comparando propriedades entre materiais distintos e a segunda, entre os briquetes produzidos de forma padronizada. Para realizar a segunda etapa de caracterização é necessário desenvolver e construir um novo reator de briquetagem, além de produzir novos briquetes.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Pesquisa bibliográfica

O enfoque da pesquisa bibliográfica foi em materiais de órgãos reguladores da briquetagem, tanto no Brasil quanto no exterior, em artigos científicos e em normas internacionais de padronização da briquetagem comercial.

Os principais materiais de estudo de órgãos reguladores da briquetagem foram os produzidos pela Embrapa, tendo os mesmos grande relevância no campo internacional. As normas contidas nos mesmos para a caracterização das propriedades de briquetes comerciais foram as normas ASTM (American Society for Testing and Materials), normas estas adotadas tanto pela Embrapa, quanto por órgãos dos Estados Unidos e de países da União Europeia.

Devido a nova forma que os briquetes analisados são produzidos e a sua composição distinta, priorizou-se avaliar nos artigos científicos estudados quais as técnicas de caracterização são usadas atualmente e como poderiam ser aplicadas neste novo produto utilizando os recursos disponíveis dentro do Instituto Politécnico de Nova Friburgo (IPRJ) junto com a supervisão do orientador deste trabalho, além dos professores pesquisadores e técnicos responsáveis pelos laboratórios utilizados.

Para a seleção das propriedades que deveriam ser analisadas, Silva et al. (2015) determina que a densidade, o poder calorífico, o teor de cinzas e a resistência ao empilhamento são propriedades fundamentais na caracterização de um briquete de biomassa constituído da serragem de eucalipto e/ou piuns, além do bagaço e/ou da palha da cana-de-açúcar.

Conforme descrito por Sant'Anna et al. (2012), além das propriedades descritas anteriormente, é necessário se conhecer a composição dos briquetes antes e após a briquetagem da mistura e, principalmente, após a queima do mesmo.

Com isso, definiu-se que as principais técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho seriam em análises destrutivas tendo como ensaios mecânicos, térmicos e de queima, já comumente utilizados em diversas linhas de pesquisa para materiais lignocelulósicos, além de análises não destrutivas tendo como ensaios por raios-x e infravermelho, a fim de se avaliar precisamente a composição dos mesmos.

1.2 A técnica de briquetagem por baleada hermética

A técnica de briquetagem por batelada hermética consiste em compactar e aglutinar os resíduos orgânicos, principalmente os de madeira. Tal técnica se utiliza de um reator hermético de batelada que possui um pistão/êmbolo, que além de impor uma pressão de compactação à mistura (resíduos de madeira e alimentícios, além de óleo de cozinha usado e água) proporciona uma vedação em conjunto com o molde do briquete, permitindo que a pressão de vapor d'água atue como um agente carreador da lignina contida nas sobras de madeira para a superfície externa do material, selando e unindo as partes. Além disso, a vedação do reator hermético de briquetagem ajuda no rápido cozimento dos resíduos alimentícios pela ação da pressão do vapor d'água, melhorando assim a aglutinação do briquete.

Os parâmetros de operação mínimos de briquetagem desta técnica, para produção de briquetes com resistência mecânica mínima para o manuseio e uma densidade seca média de $0,8 \text{ g/cm}^3$, devem ser de:

- Pressão de compactação entre 2,0 MPa e 3,0 MPa;
- Temperatura de aquecimento do molde entre 160 °C e 180 °C;
- Tempo de compactação / aglutinação entre 5 minutos e 15 minutos.

Observa-se que os valores descritos acima para a pressão de compactação e a temperatura de aquecimento do molde, podem ser alterados para valores maiores com o objetivo de se produzir briquetes de densidade seca média maior e/ou para se reduzir o tempo de compactação / aglutinação ou tempo de produção da mistura em briquete.

Já o percentual de peso ideal dos componentes da mistura para um briquete a ser produzido pela técnica de briquetagem por batelada hermética, deve ser:

- (a) de 40% a 100% em peso de resíduos de madeira (e/ou materiais lignocelulósicos) de alta e/ou baixa granulometria;
- (b) de 0% a 60% em peso de resíduos alimentícios;

Essas porcentagens sendo expressas em peso úmido natural, ou peso seco com umidade residual dos materiais em relação à mistura de (a) e (b);

Na mistura também podem ser adicionados aditivos para a queima, a exemplo de óleos de frituras usados com uma quantidade ideal entre 5,0 ml e 25,0 ml para cada 130,0 g de massa da mistura de (a) e (b).

Observa-se que ao efetuar a briquetagem por esta técnica com ausência de resíduos alimentícios em sua mistura, deve-se adicionar água em proporção entre 4% e 20% do peso dos resíduos de madeira. Já com a presença de resíduos alimentícios na mistura, deve-se adicionar a água em mesma proporção de massa dos resíduos alimentícios e os mesmos devem ser triturados para uma melhor mistura. Além disso, na mistura de material é possível utilizar resíduos alimentícios previamente cozidos ou não.

Após a produção dos briquetes, os mesmos devem ser estocados para a retirada do excesso de umidade contida neles, sendo esta etapa essencial para se ter um produto com melhor desempenho na queima. O tempo médio para a estocagem de um briquete em contato direto com ambiente varia de um a cinco dias, dependendo do clima.

Já para estocagem em estufa, em uma faixa de temperatura entre 80 °C e 100 °C, o tempo médio varia de 12 a 24 horas. Após o período de estocagem, os briquetes podem ser armazenados por tempo indeterminado até sua queima.

Por fim, observa-se que pelo caráter inovador da técnica desenvolvida, foi redigida uma patente verde, definindo as principais variáveis e etapas do processo não contínuo de briquetagem por batelada hermética. A mesma foi aprovada e registrada pelo Escritório de Propriedade Intelectual da UERJ junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial), tornando-se o primeiro depósito de patente verde do Instituto Politécnico de Nova Friburgo (IPRJ).

1.3 Cálculos e geração de gráficos

Todos os dados e resultados gerados pelos softwares dos equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização foram transportados para o software Excel 2013, no qual foram realizados cálculos gerais, cálculos de desvio e erro padrão, além da criação de tabelas e gráficos que estão apresentados nesta dissertação.

2 PRIMEIRA ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO

Nesta etapa, avaliou-se as propriedades térmicas, de queima e de estabilidade de briquetes, que são produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, em comparação com briquetes comerciais e a lenha de eucalipto. Observa-se que os briquetes produzidos utilizados nessa etapa foram feitos durante a graduação em 2014.

As características do briquete Tramontina e da lenha de eucalipto que foram utilizados na primeira etapa de caracterização deste trabalho, podem ser observadas nas figuras 4 e 5:

Figura 4 - Briquete Tramontina



Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar na figura 4, padrões de ranhuras no corpo do briquete Tramontina, o que caracteriza que sua produção é pela briquetagem por extrusão RAM.

Figura 5 - Lenha de eucalipto



Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que a lenha de eucalipto da figura 5, foi coletada no mesmo dia em que foi retirada da árvore, por isso percebe-se as manchas de umidade em sua superfície.

As características dos briquetes produzidos na graduação, que foram utilizados na primeira etapa de caracterização deste trabalho podem ser observadas nas tabelas 1, 2 e 3:

Tabela 1 - Características do briquete produzido no teste 3

Teste 3		Realizado em 13/02/2014		
Briquete	Retirado em 14/02/2014			
				
	Diâmetro	86 mm	Massa	184,29 g
	Altura	47 mm	Densidade	0,675 g/cm ³

Fonte: O autor, 2014.

O briquete da tabela 1 possui em sua composição grânulos de eucalipto, arroz cozido batido com água e óleo de cozinha usado. O mesmo foi produzido sem uma pressão de compactação e com uma temperatura de aquecimento de 200 °C durante 40 minutos.

Tabela 2 - Características do briquete produzido no teste 4

Teste 4		Realizado em 14/02/2014		
Briquete	Retirado em 18/02/2014			
				
	Diâmetro	86 mm	Massa	490,53 g
	Altura	95 mm	Densidade	0,889 g/cm ³

Fonte: O autor, 2014.

O briquete da tabela 2 possui em sua composição grânulos de eucalipto, arroz cozido batido com água e óleo de cozinha usado. O mesmo foi produzido com uma pressão de compactação de 186 kPa e com uma temperatura de aquecimento de 200 °C durante 45 minutos.

Tabela 3 - Características do briquete produzido no teste 11

Teste 11		Realizado em 18/03/2014	
Briquete	Retirado em 18/03/2014		
			
	Diâmetro	86 mm	Massa
	Altura	25 mm	Densidade
		131,72 g	0,907 g/cm ³

Fonte: O autor, 2014.

O briquete da tabela 3 possui em sua composição grânulos de eucalipto e amido de milho misturado com água. O mesmo foi produzido com uma pressão de compactação de 2,53 MPa (1,5 toneladas) e com uma temperatura de aquecimento de 200 °C durante 40 minutos.

Pode-se observar pelas tabelas anteriores, que os briquetes produzidos durante a graduação que foram utilizados nos ensaios da primeira etapa de caracterização, possuem densidade e dimensões características que estão dentro das faixas regulamentadas pela Embrapa.

2.1 Análise de espectroscopia por raios-x

A técnica de espectroscopia por raios-x utilizada nesta análise, foi a de fluorescência, a qual consiste em incidir raios-x de forma inclinada sobre a superfície de um material e analisar a sua resposta pelos raios liberados para o detector. Apesar desta análise ser pouco aplicada para materiais orgânicos, devido a sua precisão nos resultados para estes materiais, viu-se a necessidade de comparar as respostas obtidas entre o briquete Tramontina e um dos briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, a fim de se determinar a presença de algum material inorgânico como impureza na composição que poderia ser nocivo ao meio ambiente durante a sua queima.

2.1.1 Materiais utilizados

As características dos briquetes utilizados nesta análise, podem ser observadas na figura 6:

Figura 6 - Amostras da análise de espectroscopia por raios-x



(a)

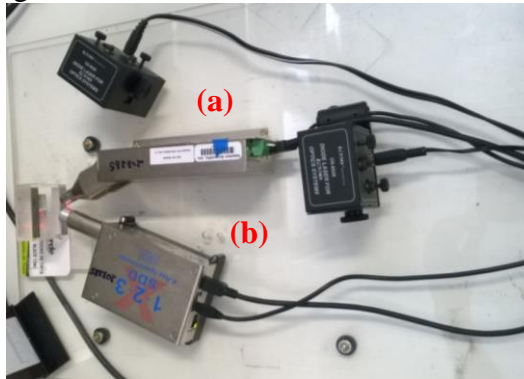
(b)

Legenda: (a) - briquete Tramontina; (b) - briquete produzido no teste 4.

Fonte: O autor, 2015.

O equipamento utilizado para emissão de raios-x e detecção da resposta do material pode ser observado na figura 7:

Figura 7 - Gerador de raios-x e detector SDD



Legenda: (a) - gerador de raios-x; (b) - detector SDD.

Fonte: O autor, 2015.

Observa-se que o equipamento da figura 7, contém um gerador de raios-x e um detector SDD (detector de raios-x de silício) acoplados a um computador com os softwares de controle e aquisição dos dados. Este equipamento encontra-se no Laboratório de Morfologia de Materiais do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, o qual foi utilizado com permissão do professor Dr. Joaquim Teixeira de Assis, que é o responsável por este laboratório.

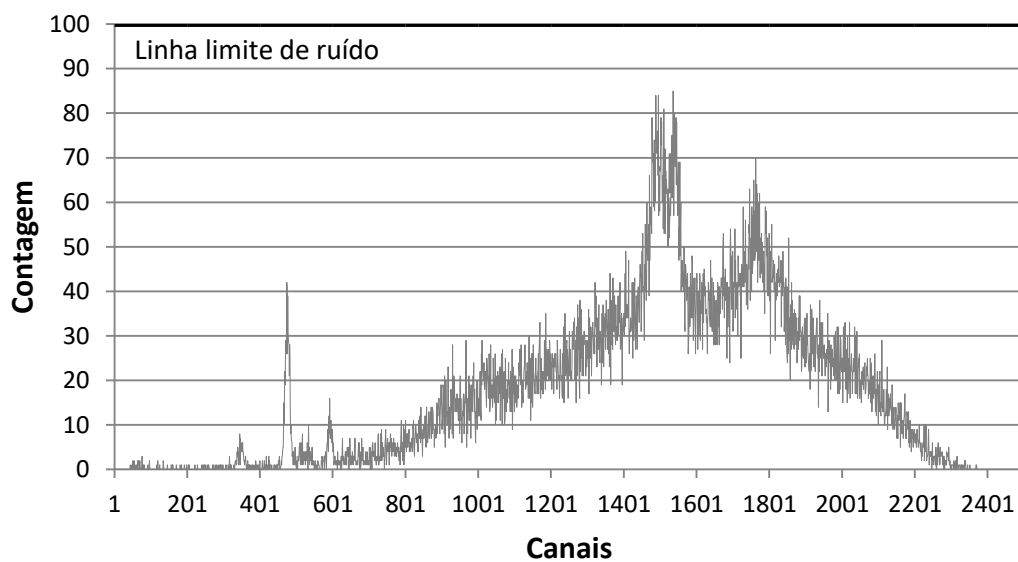
2.1.2 Métodos

Na análise, posicionou-se ambos os briquetes de forma a avaliar suas superfícies lateral e transversal. O tempo de aquisição dos dados foi de 10 minutos para cada superfície de cada briquete. Estando o gerador de raios-x com uma voltagem de 15,0 kV e amperagem em 15,0 μ A durante todos os ensaios. Novamente, observa-se que devido à natureza orgânica dos materiais analisados, apenas elementos não pertencentes a sua estrutura, ou seja, elementos inorgânicos contaminantes são detectados pelo equipamento, isto se deve à resolução do detector SDD utilizado.

2.1.3 Dados e resultados

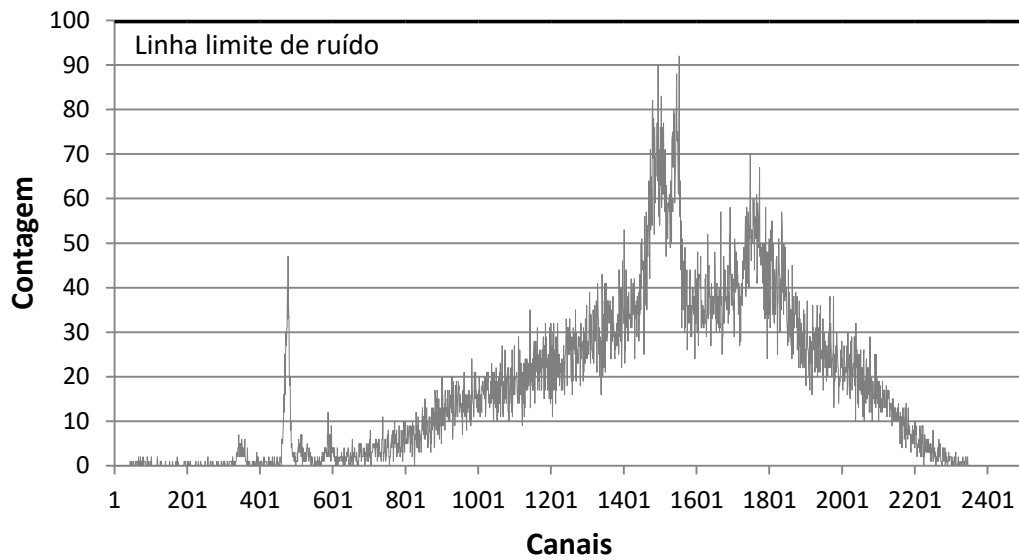
Os resultados obtidos nesta análise, podem ser observados nos gráficos 1, 2, 3 e 4:

Gráfico 1 - Resultados na face lateral do briquete Tramontina



Fonte: O autor, 2015.

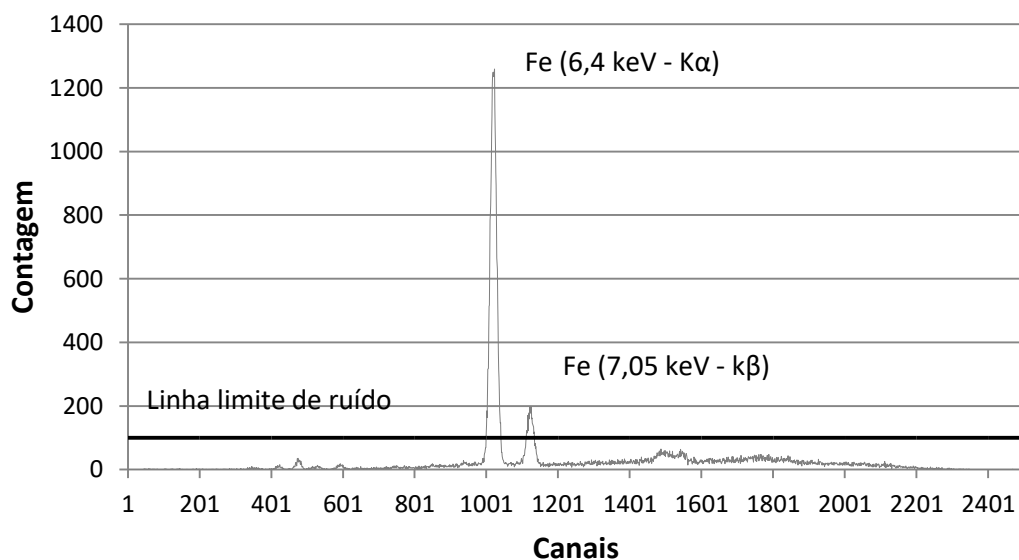
Gráfico 2 - Resultados na face transversal do briquete Tramontina



Fonte: O autor, 2015.

Pode-se observar nos gráficos 1 e 2 para o briquete Tramontina, que não há a presença de nenhum pico característico acima da linha limite de ruído de elementos detectáveis pelo equipamento.

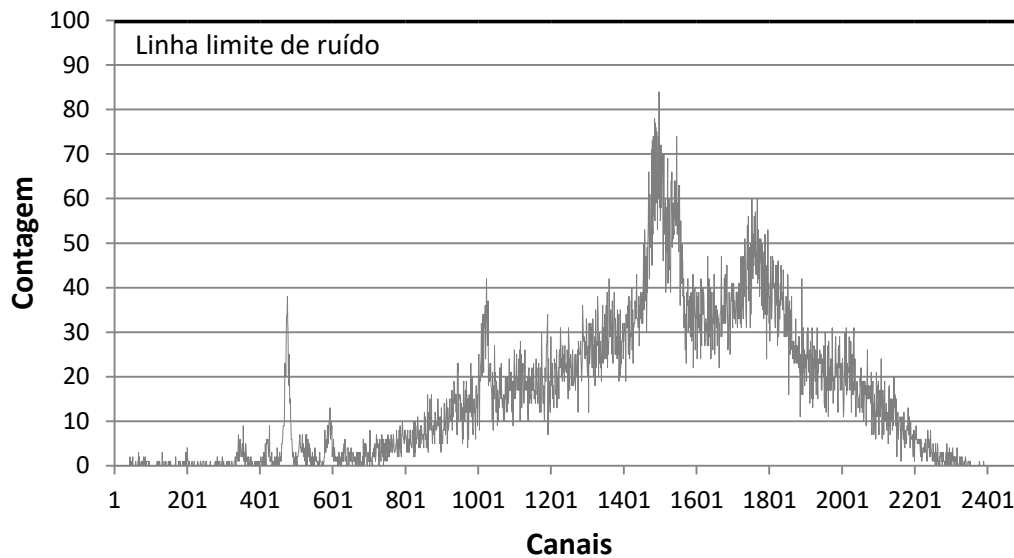
Gráfico 3 - Resultados na face lateral do briquete produzido no teste 4



Fonte: O autor, 2015.

Pode-se observar no gráfico 3 que na face lateral do briquete produzido no teste 4, há a presença de dois picos característicos do elemento ferro acima da linha limite de ruído.

Gráfico 4 - Resultados na face transversal do briquete produzido no teste 4



Fonte: O autor, 2015.

Pode-se observar no gráfico 4 que na face transversal do briquete produzido no teste 4, não há a presença de nenhum pico característico acima da linha limite de ruído de elementos detectáveis pelo equipamento.

2.1.4 Observações

Como observado nos gráficos anteriores, o briquete da Tramontina não apresentou nenhuma contagem significativa de algum elemento contaminante nas superfícies do mesmo. Isto se deve à utilização de resíduos exclusivamente “secos” na briquetagem por extrusão RAM. Enquanto isso, o briquete produzido no teste 4 apresentou o elemento ferro como contaminante na sua superfície lateral. A presença do ferro neste briquete deve-se ao fato da utilização de material úmido na briquetagem por batelada hermética e pela camisa do molde utilizado no reator não ser inoxidável, o que gerou a formação de óxidos de ferro na superfície do briquete durante o processo de produção do mesmo.

Uma solução para impedir a contaminação de ferro nos briquetes a serem produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, é a utilização de ligas metálicas inoxidáveis na confecção das camisas dos moldes ou na pintura dos mesmos com tintas térmicas de proteção.

Observa-se que apesar da presença do ferro na superfície do briquete produzido, o mesmo não interfere na eficiência de queima do briquete ou em alguma contaminação grave para o meio ambiente.

2.2 Análise de teor de cinzas

Esta análise teve como finalidade avaliar o quanto de cinzas são geradas durante a queima dos briquetes.

2.2.1 Materiais utilizados

As amostras utilizadas nesta análise são novamente o briquete Tramontina e o briquete produzido no teste 4.

As características das amostras utilizadas nesta análise, podem ser observadas na figura 8:

Figura 8 - Amostras da análise de teor de cinzas



Legenda: (a) - briquete Tramontina; (b) - briquete produzido no teste 4.

Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar na figura 8, que na preparação das amostras foram retiradas lascas de cada briquete sendo colocadas dentro de um cadinho de cerâmica resistente à alta temperatura.

Também se utilizou de uma balança de precisão e um forno de resistências, equipamentos estes que podem ser observados nas figuras 9 e 10:

Figura 9 - Balança de precisão
Martes Série AS5500C



Fonte: O autor, 2016.

Figura 10 - Forno de resistências JUNG modelo 7012



Fonte: O autor, 2016.

Os equipamentos das figuras 9 e 10 encontram-se no Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte (LF²T) do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, os quais foram utilizados com permissão do orientador deste projeto, professor Dr. Leôncio Diógenes Tavares Câmara, que é o responsável por este laboratório.

2.2.2 Métodos

Iniciou-se esta análise aferindo a massa do cadinho de cerâmica com a balança de precisão Martes Série AS5500C, posteriormente colocou-se lascas da amostra dentro do cadinho e aferiu-se a massa do conjunto amostra/cadinho. Enquanto as massas eram catalogadas, o forno de resistências JUNG modelo 7012 foi configurado para se aquecer da

temperatura ambiente, com uma rampa de aquecimento de 10 °C/min., até 525 °C e manter-se nessa temperatura por uma hora.

Quando a temperatura do forno alcançou 170 °C, a amostra foi posta dentro do mesmo, sendo posicionada no centro da câmara interna do forno e esperou-se que a temperatura de 525 °C fosse alcançada. Após alcançada a temperatura desejada, a porta do forno foi aberta em fresta, por 2 segundos a cada 20 minutos durante o tempo do ensaio, a fim de entrar mais oxigênio dentro do forno, melhorando assim a queima da amostra.

A temperatura de 525 °C foi escolhida, porque até esta temperatura todos os componentes da matéria orgânica sofrem combustão.

Com o fim do tempo de queima estipulado para a amostra, o forno se desligou e sua porta foi totalmente aberta por 12 minutos, para o resfriamento do cadinho e da câmara interna do forno, possibilitando assim a retirada com segurança do conjunto cinzas/cadinho. Em seguida, o conjunto cinzas/cadinho foi posicionado em cima da balança e após a estabilização de sua temperatura, sua massa foi catalogada. Esta sequência de etapas foi realizada três vezes para cada amostra.

Observa-se que foram utilizadas luvas de proteção contra calor durante todo o tempo em que se colocou e retirou o cadinho do forno.

2.2.3 Dados e resultados

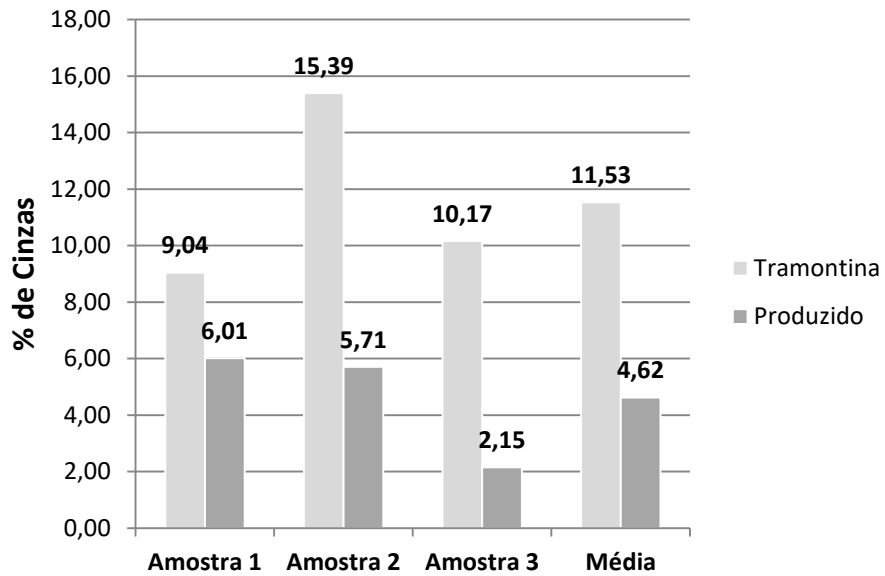
Os resultados obtidos nesta análise podem ser observados na tabela 4 e no gráfico 5:

Tabela 4 - Dados da análise de teor de cinzas

	Briquete Tramontina			Briquete produzido no teste 4		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa Amostra	14,93 g	17,15 g	14,36 g	16,14 g	15,58 g	16,28 g
Massa Cinzas	1,35 g	2,64 g	1,46 g	0,97 g	0,89 g	0,35 g
Teor de Cinzas	9,04 %	15,39 %	10,17 %	6,01 %	5,71 %	2,15 %
Média	11,53 %			4,62 %		

Fonte: O autor, 2016.

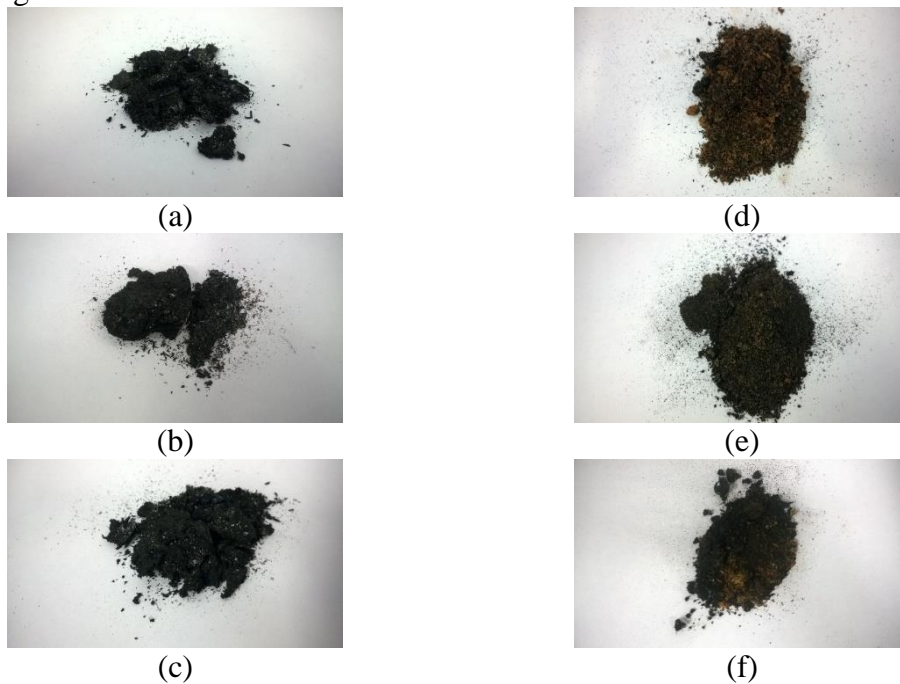
Gráfico 5 - Percentual de cinzas



Fonte: O autor, 2016.

As características das cinzas obtidas nesta análise podem ser observadas na figura 11:

Figura 11 - Cinzas obtidas



Legenda: (a) - briquete Tramontina (Amostra 1); (b) - briquete Tramontina (Amostra 2); (c) - briquete Tramontina (Amostra 3); (d) - briquete produzido (Amostra 1); (e) - briquete produzido (Amostra 2); (f) - briquete produzido (Amostra 3).

Fonte: O autor, 2016.

2.2.4 Observações

Como observado na tabela e no gráfico anterior, o briquete da Tramontina apresentou a geração de uma maior quantidade de cinzas do que o briquete produzido no teste 4. Além disso, pode-se observar na figura anterior que enquanto as cinzas do briquete Tramontina ficaram com um aspecto totalmente escuro, as cinzas do briquete produzido ficaram com uma coloração amarronzada, cor esta devido a presença de óxidos de ferro na composição do mesmo.

Esta análise comprovou que a adição de resíduos alimentícios na mistura de um briquete lignocelulósico melhora a queima do mesmo, diminuindo assim a geração de cinzas e com isso aumentando sua eficiência térmica por massa.

2.3 **Análise térmica**

Esta análise teve como finalidade avaliar a variação de massa e de energia dos materiais lignocelulósicos com o aumento de sua temperatura.

2.3.1 Materiais utilizados

As amostras utilizadas nesse ensaio foram o briquete Tramontina, os briquetes produzidos no teste 3, teste 4 e teste 11, além da lenha de eucalipto.

O equipamento utilizado para realização desta análise térmica pode ser observado na figura 12:

Figura 12 - Analisador térmico
PerkinElmer STA 6000



Fonte: O autor, 2016.

O equipamento da figura 12 encontra-se no Laboratório de Biomateriais do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, o qual foi utilizado com permissão da professora Dr^a. Mônica Calixto de Andrade, que é a responsável por este laboratório. O mesmo se utiliza das técnicas de TG (Análise Termogravimétrica), DTG (Análise Termogravimétrica Derivativa), DSC (Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial).

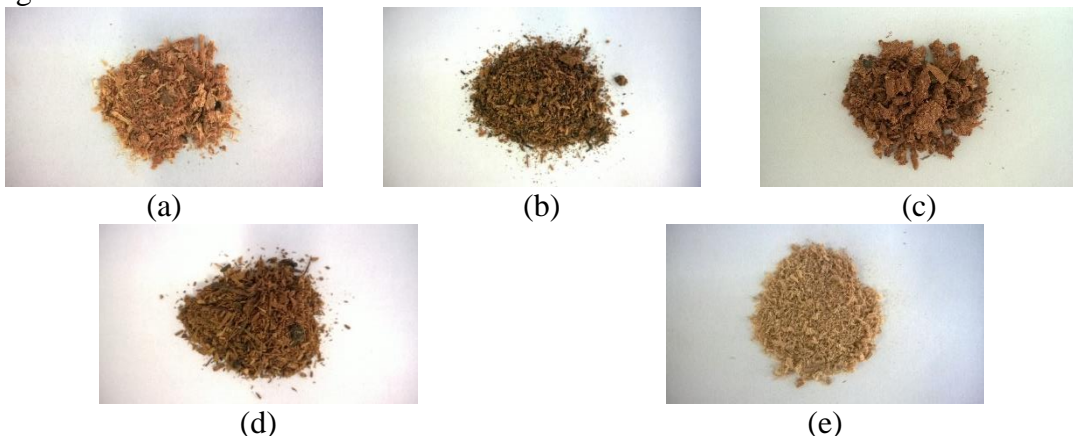
2.3.2 Métodos

Primeiramente, retirou-se pedaços de regiões distintas da amostra e os colocou dentro de um saco plástico transparente, em seguida fez-se a trituração dos mesmos através de batidas com um martelo até que todas as partículas tivessem visualmente as mesmas dimensões. As dimensões obtidas possuíam um aspecto entre pó e grânulo.

Posteriormente, separou-se dessa mistura uma quantidade representativa da amostra e colocou a mesma na câmara de análise do equipamento. Em seguida, definiu-se no software de controle do equipamento quais ensaios seriam realizados e qual seria o fluxograma de aquecimento. Após decorrido o tempo de análise, os dados obtidos pelo software do equipamento para a TG, DTG e DSC foram catalogados e analisados. Esta sequência de etapas foi realizada cinco vezes para cada amostra.

A granulometria das amostras utilizadas nesta análise pode ser observada na figura 13:

Figura 13 - Granulometria das amostras utilizadas na análise térmica



Legenda: (a) - briquete Tramontina; (b) - briquete produzido no teste 4; (c) - briquete produzido no teste 11; (d) - briquete produzido no teste 3; (e) - lenha de eucalipto.

Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que a rampa de aquecimento em todos os ensaios foi de 5 °C/min. e que a temperatura final definida para a o primeiro ensaio de cada amostra foi de 700 °C, ensaio este considerado como triagem, e para os quatro ensaios seguintes de cada amostra a temperatura final definida foi de 550 °C.

2.3.3 Dados e resultados

Os resultados obtidos nesta análise, assim como as estimativas dos valores das principais propriedades térmicas de cada amostra podem ser observados nas tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10:

Observa-se que o ΔH Total corresponde a variação de energia por massa de toda a reação de queima e o ΔH Exotérmico corresponde a variação de energia por massa apenas da zona exotérmica da reação de queima e é o poder calorífico estimado da amostra. A perda % de massa corresponde a massa da amostra que foi consumida apenas na zona exotérmica.

Tabela 5 - Dados da análise térmica do briquete Tramontina

	Amostra 1-Triagem	Amostra 1-A	Amostra 1-B	Amostra 1-C	Amostra 1-D
Massa Inicial	20,412 mg	20,406 mg	20,458 mg	20,402 mg	20,453 mg
% de Umidade	8,01 %	8,10 %	7,86 %	8,29 %	8,17 %
ΔH Total	8.154,31 J/g	5.553,26 J/g	5.556,38 J/g	5.883,18 J/g	6.003,09 J/g
ΔH Exotérmico	624,70 J/g	1.779,92 J/g	1.979,63 J/g	1.897,23 J/g	4.007,60 J/g
Ti Exotérmico	319,57 °C	311,47 °C	303,27 °C	306,46 °C	247,80 °C
Tf Exotérmico	493,92 °C	504,53 °C	501,72 °C	500,26 °C	507,27 °C
Perda % de Massa	36,72 %	63,94 %	69,00 %	69,43 %	88,10 %

Fonte: O autor, 2016.

Como visto na tabela 5, a variação da perda % de massa máxima entre as amostras foi de 51,38 %, comprovando assim uma baixa uniformidade do material analisado.

Tabela 6 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 4

	Amostra 2-Triagem	Amostra 2-A	Amostra 2-B	Amostra 2-C	Amostra 2-D
Massa Inicial	20,366 mg	20,425 mg	20,458 mg	20,432 mg	20,473 mg
% de Umidade	8,29 %	7,95 %	8,77 %	8,53 %	7,71 %
ΔH Total	10.368,57 J/g	7.776,09 J/g	7.201,87 J/g	7.765,29 J/g	7.626,92 J/g
ΔH Exotérmico	3.070,61 J/g	3.927,54 J/g	3.262,81 J/g	3.371,51 J/g	4.658,06 J/g
Ti Exotérmico	294,78 °C	275,13 °C	281,07 °C	285,20 °C	263,81 °C
Tf Exotérmico	480,62 °C	485,37 °C	479,12 °C	473,39 °C	484,67 °C
Perda % de Massa	68,03 %	79,74 %	72,03 %	69,75 %	82,02 %

Fonte: O autor, 2016.

Como visto na tabela 6, a variação da perda % de massa máxima entre as amostras foi de 13,99 %, comprovando assim uma maior uniformidade do material analisado.

Tabela 7 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 11

	Amostra 3-Triagem	Amostra 3-A	Amostra 3-B	Amostra 3-C	Amostra 3-D
Massa Inicial	20,327 mg	20,436 mg	20,428 mg	20,431 mg	20,455 mg
% de Umidade	10,90 %	10,55 %	10,53 %	10,11 %	8,98 %
ΔH Total	10.411,47 J/g	6.540,05 J/g	6.763,26 J/g	6.952,72 J/g	6.158,62 J/g
ΔH Exotérmico	2.160,89 J/g	1.947,10 J/g	2.303,48 J/g	2.051,52 J/g	2.580,71 J/g
Ti Exotérmico	309,57 °C	305,89 °C	303,13 °C	309,35 °C	295,61 °C
Tf Exotérmico	480,72 °C	482,80 °C	480,85 °C	481,22 °C	479,56 °C
Perda % de Massa	61,09 %	60,74 %	63,65 %	60,35 %	61,48 %

Fonte: O autor, 2016.

Como visto na tabela 7, a variação da perda % de massa máxima entre as amostras foi de 3,3 %, comprovando assim uma alta uniformidade do material analisado.

Tabela 8 - Dados da análise térmica do briquete produzido no teste 3

	Amostra 4-Triagem	Amostra 4-A	Amostra 4-B	Amostra 4-C	Amostra 4-D
Massa Inicial	20,465 mg	20,448 mg	20,444 mg	20,463 mg	20,459 mg
% de Umidade	7,76 %	6,87 %	7,67 %	7,51 %	7,67 %
ΔH Total	10.814,17 J/g	7.436,34 J/g	7.702,72 J/g	7.010,81 J/g	7.572,55 J/g
ΔH Exotérmico	3.315,66 J/g	3.572,14 J/g	3.353,46 J/g	2.766,82 J/g	4.353,73 J/g
Ti Exotérmico	303,53 °C	293,51 °C	298,07 °C	305,35 °C	278,63 °C
Tf Exotérmico	486,57 °C	486,05 °C	482,81 °C	491,86 °C	481,63 °C
Perda % de Massa	66,34 %	70,49 %	66,94 %	64,11 %	75,56 %

Fonte: O autor, 2016.

Como visto na tabela 8, a variação da perda % de massa máxima entre as amostras foi de 11,45 %, comprovando assim uma maior uniformidade do material analisado.

Tabela 9 - Dados da análise térmica da lenha de eucalipto

	Amostra 5-Triagem	Amostra 5-A	Amostra 5-B	Amostra 5-C	Amostra 5-D
Massa Inicial	20,312 mg	20,424 mg	20,406 mg	20,420 mg	20,447 mg
% de Umidade	16,83 %	12,60 %	15,91 %	15,37 %	13,25 %
ΔH Total	9.843,27 J/g	7.166,38 J/g	7.226,86 J/g	6.611,21 J/g	6.826,27 J/g
ΔH Exotérmico	2.803,28 J/g	2.948,78 J/g	2.927,87 J/g	3.368,49 J/g	3.275,42 J/g
Ti Exotérmico	271,73 °C	272,43 °C	275,62 °C	258,19 °C	265,01 °C
Tf Exotérmico	457,49 °C	456,44 °C	459,71 °C	462,67 °C	462,79 °C
Perda % de Massa	74,20 %	74,12 %	70,17 %	77,43 %	77,15 %

Fonte: O autor, 2016.

Como visto na tabela 9, a variação da perda % de massa máxima entre as amostras foi de 7,26 %, comprovando assim uma alta uniformidade do material analisado.

Os gráficos de TG, DTG e DSC de todas as amostras das tabelas anteriores podem ser observados no Apêndice A, na página 75, desta dissertação.

Tabela 10 - Estimativa de propriedades das amostras

	Briquete Tramontina	Briquete produzido no teste 4	Briquete produzido no teste 11	Briquete produzido no teste 3	Lenha de Eucalipto
ΔH Total	5.748,98 ± 114,74 J/g	7.592,54 ± 134,58 J/g	6.603,66 ± 170,64 J/g	7.430,61 ± 150,13 J/g	6.957,68 ± 145,29 J/g
ΔH Exotérmico	2.416,09 ± 532,08 J/g	3.804,98 ± 319,45 J/g	2.220,70 ± 141,40 J/g	3.511,54 ± 328,20 J/g	3.130,14 ± 112,44 J/g
T_i Exotérmico	292,25 ± 14,91 °C	276,30 ± 4,65 °C	303,50 ± 2,92 °C	293,89 ± 5,64 °C	267,81 ± 3,90 °C
T_f Exotérmico	503,45 ± 1,55 °C	480,64 ± 2,79 °C	481,11 ± 0,67 °C	485,59 ± 2,29 °C	460,40 ± 1,50 °C
Perda % de Massa	72,62 ± 5,31 %	75,88 ± 2,96 %	61,55 ± 0,74 %	69,27 ± 2,47 %	74,72 ± 1,69 %

Fonte: O autor, 2016.

2.3.4 Observações

Como observado nas tabelas anteriores, os briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética obtiveram valores de ΔH Total e ΔH Exotérmico próximos ou muito superiores aos da lenha de eucalipto e do briquete Tramontina. Observa-se também que a faixa de temperatura em que ocorreu as zonas exotérmicas foram semelhantes entre as amostras, com pequenas variações de temperatura. Além disso, pode-se observar que a perda % de massa de todas as amostras foi superior aos 60 %, comprovando assim um alto rendimento na geração de energia térmica produzida por massa.

2.4 Análise de composição por queima

Esta análise teve como finalidade avaliar a variação de massa dos materiais lignocelulósicos, a fim de se comparar o % de celulose/hemicelulose e o % de lignina contidas nas amostras.

2.4.1 Materiais utilizados

Além das amostras da análise anterior, novamente foram utilizados, assim como na análise de teor de cinzas, a balança de precisão e o forno de resistências.

2.4.2 Métodos

Como feito no ensaio de análise térmica, primeiramente, retirou-se pedaços de regiões distintas da amostra e os colocou dentro de um saco plástico transparente, em seguida fez-se a trituração dos mesmos através de batidas com um martelo até que todas as partículas tivessem visualmente as mesmas dimensões. As dimensões obtidas possuíam um aspecto entre pó e grânulo.

Posteriormente, aferiu-se a massa dos cadinhos de cerâmica que seriam utilizados. Após a catalogação da massa dos mesmos, colocou-se uma quantidade representativa de cada amostra dentro de seu cadinho correspondente e em seguida fez-se a medição da massa do conjunto amostra/cadinho para cada amostra.

Enquanto as massas eram catalogadas, o forno de resistências foi configurado para se aquecer da temperatura ambiente, com uma rampa de aquecimento de 5 °C/min., até 100 °C e manter-se nessa temperatura por uma hora. Quando a temperatura do forno alcançou 100 °C, as amostras foram postas dentro do mesmo, sendo posicionadas no centro da câmara interna do forno.

Após decorrido o tempo de uma hora, para a secagem das amostras, o forno se desligou e sua porta foi totalmente aberta, possibilitando assim a retirada com segurança dos conjuntos

amostras secas/cadinhos. Em seguida, os conjuntos amostras secas/cadinhos foram posicionados na bancada de mármore e após a estabilização de suas temperaturas com o ambiente, um a um teve sua massa aferida com a balança de precisão e catalogada.

Enquanto as massas eram catalogadas, o forno de resistências foi configurado para se aquecer da temperatura de 100 °C, com uma rampa de aquecimento de 20 °C/min., até 360 °C e manter-se nessa temperatura por três horas. Quando a temperatura do forno alcançou 360 °C, as amostras secas foram postas dentro do mesmo, sendo posicionadas no centro da câmara interna do forno.

A temperatura de 360 °C foi escolhida, porque até esta temperatura toda a celulose e hemicelulose de um material lignocelulósico é consumida na queima, enquanto a lignina contida no mesmo só começa a ser consumida após 460 °C. Estas temperaturas foram definidas com avaliação dos gráficos de TG e DTG obtidos na análise térmica feita anteriormente e com o estudo de artigos científicos de materiais lignocelulósicos, que comprovam que nestas faixas de temperatura, tais componentes são consumidos na queima do material. Observa-se que, infelizmente, devido a faixa de temperatura de combustão da celulose e da hemicelulose serem sobrepostas, não foi possível separar os seus percentuais de massa individuais.

Após decorrido o tempo de três horas, para a queima das amostras secas, o forno se desligou e sua porta foi totalmente aberta, com uma espera de 12 minutos para o resfriamento dos cadinhos e da câmara interna do forno, possibilitando assim a retirada com segurança dos conjuntos cinzas/cadinhos. Em seguida, os conjuntos cinzas/cadinhos foram posicionados na bancada de mármore e após a estabilização de suas temperaturas com o ambiente, um a um teve sua massa aferida com a balança de precisão e catalogada.

Observa-se que foram utilizadas luvas de proteção contra calor durante todo o tempo em que se colocou e retirou os cadinhos do forno.

2.4.3 Dados e resultados

Os resultados obtidos nesta análise podem ser observados na tabela 11 e nos gráficos 6, 7 e 8:

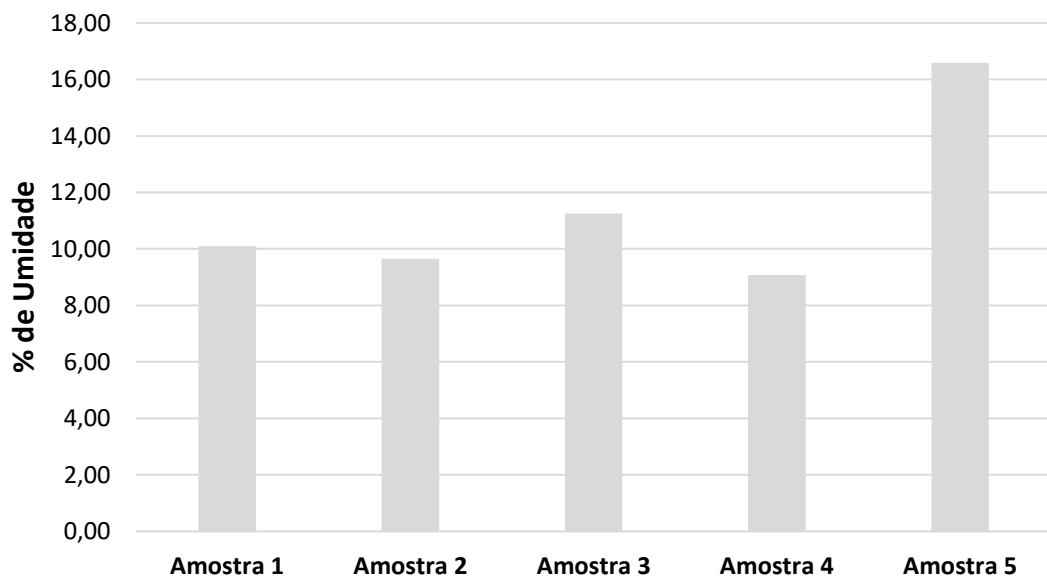
Tabela 11 - Dados da análise de composição por queima

	Briquete Tramontina	Briquete produzido no teste 4	Briquete produzido no teste 11	Briquete produzido no teste 3	Lenha de Eucalipto
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Massa Úmida	5,25 g	4,56 g	5,33 g	5,73 g	4,10 g
Massa Seca	4,72 g	4,12 g	4,73 g	5,21 g	3,42 g
% de Umidade	10,10 %	9,65 %	11,26 %	9,08 %	16,59 %
Massa de Cinzas	0,36 g	0,35 g	0,43 g	0,49 g	0,12 g
% Celulose/ Hemicelulose*	92,37 %	91,50 %	90,91 %	90,60 %	96,49 %
% Lignina*	7,63 %	8,50 %	9,09 %	9,40 %	3,51 %

(*) **Contém impurezas**

Fonte: O autor, 2016.

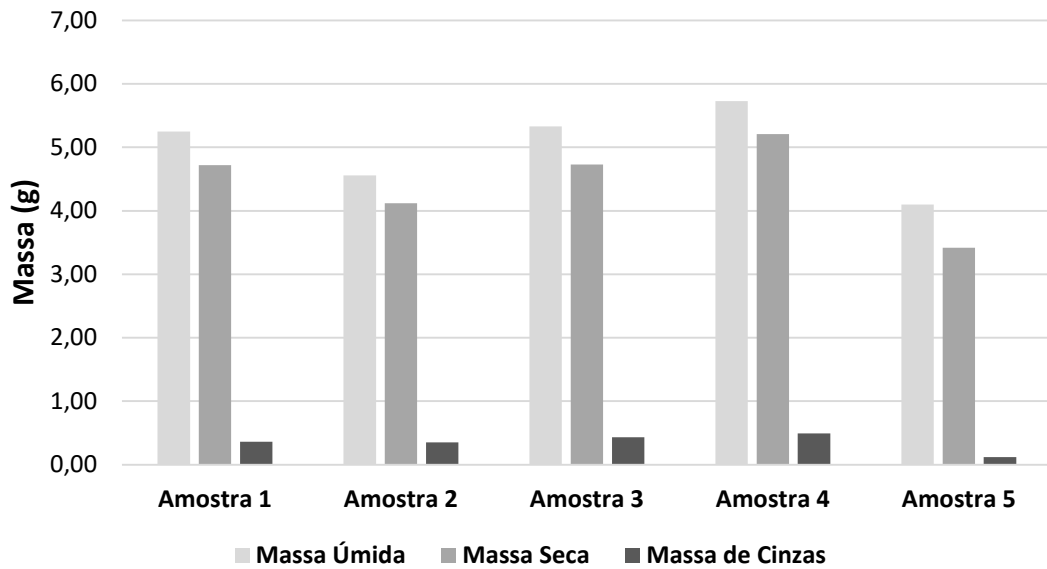
Gráfico 6 - Percentual de umidade das amostras



Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar com o gráfico 6 que a amostra 5, lenha de eucalipto, obteve o maior % de umidade em comparação com as outras amostras.

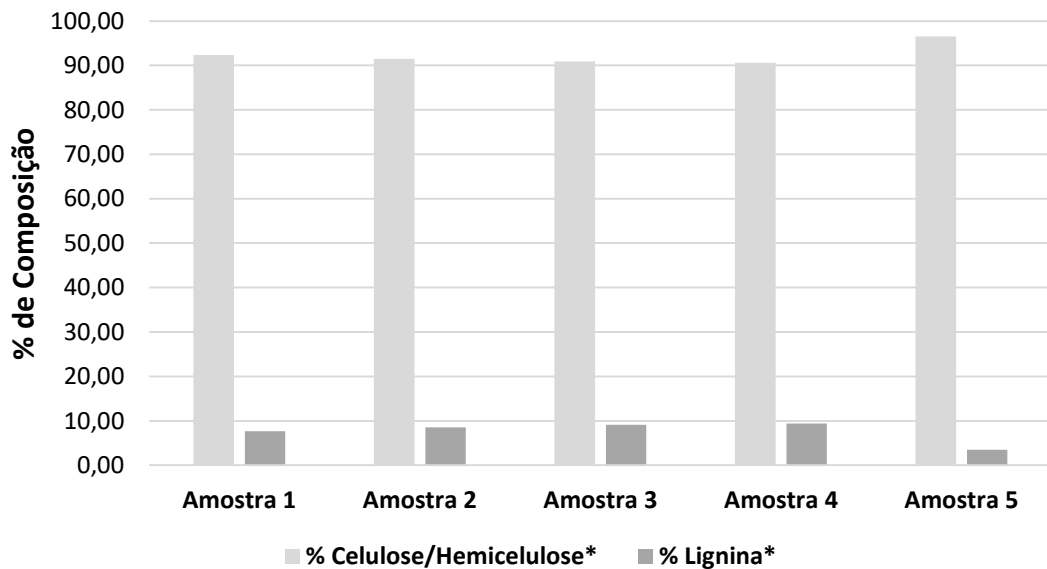
Gráfico 7 - Variação de massa



Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar com o gráfico 7 que a amostra 5, lenha de eucalipto, obteve o menor % de cinzas geradas em comparação com as outras amostras.

Gráfico 8 - Percentual de composição das amostras



(*) Contém impurezas

Fonte: O autor, 2016.

Pode-se observar com o gráfico 8 que a amostra 5, lenha de eucalipto, obteve o menor % de lignina em comparação com as outras amostras.

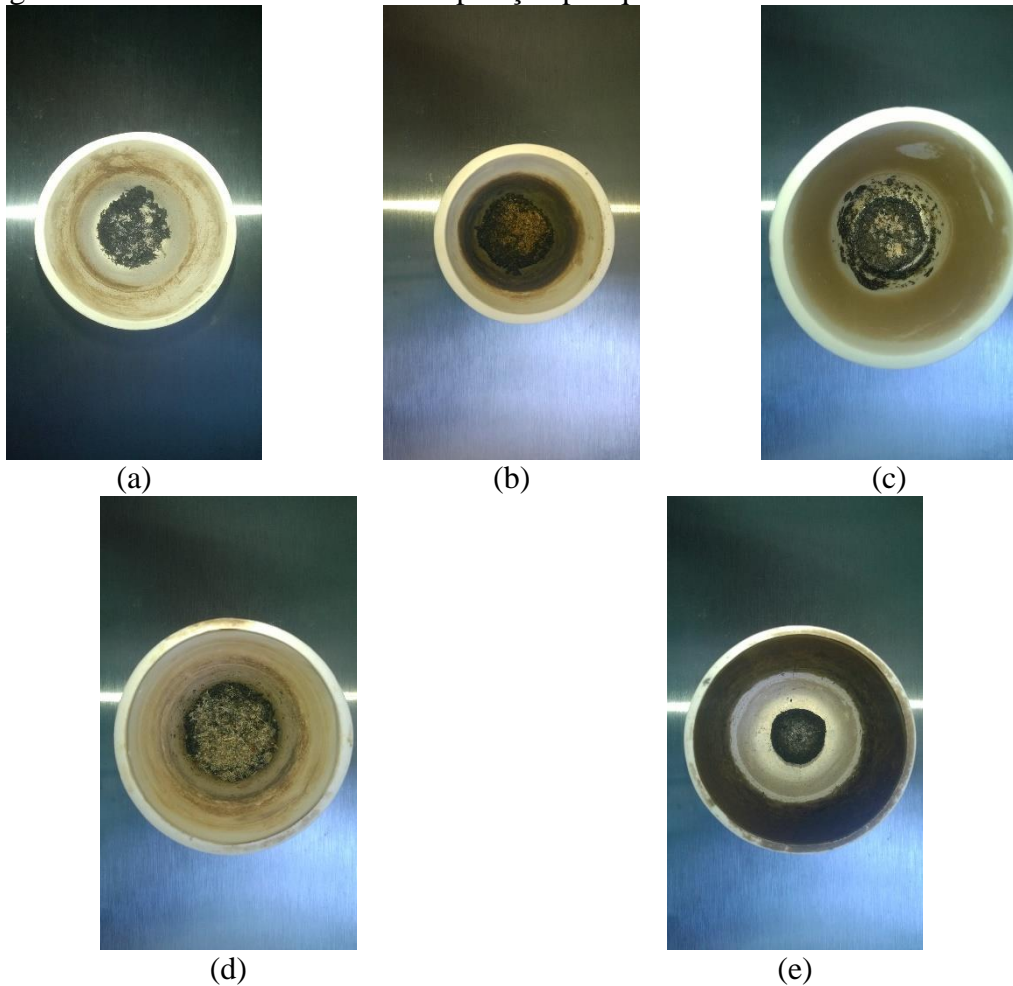
O aspecto dos cadinhos antes e depois da queima da amostra e as cinzas obtidas podem ser observados nas figuras 14 e 15:

Figura 14 - Aspecto dos cadinhos



Legenda: (a) - cadinhos antes da queima das amostras; (b) - cadinhos depois da queima das amostras.
Fonte: O autor, 2016.

Figura 15 - Cinzas da análise de composição por queima



Legenda: (a) - briquete Tramontina; (b) - briquete produzido no teste 4; (c) - briquete produzido no teste 11; (d) - briquete produzido no teste 3; (e) - lenha de eucalipto.
Fonte: O autor, 2016.

2.4.4 Observações

Como observado na tabela e nos gráficos anteriores, os briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética obtiveram valores na massa de cinzas geradas próximos ao do briquete Tramontina e muito superior ao da lenha de eucalipto. Esta diferença para a lenha de eucalipto, possivelmente, deve-se à granulometria que a amostra apresentou quando coletada, estando a maior parte da mesma com menor dimensões do que as outras amostras.

Já com relação ao % de as composições de celulose/hemicelulose e lignina, todos os briquetes analisados obtiveram valores semelhantes, enquanto a lenha de eucalipto demonstrou possuir uma quantidade maior de celulose/hemicelulose e por consequência menor quantidade de lignina. Observa-se que há a presença de impurezas não contabilizadas dentro do percentual calculado.

Pelo aspecto apresentado nos cadinhos de cerâmica após a queima das amostras, pode-se observar que o cadinho que possuía a lenha de eucalipto teve um o escurecimento de quase toda a superfície interna devido a fuligem gerada, condição está presente em materiais que entraram em combustão muito rápido com a geração principalmente de chamas. Já os cadinhos das outras amostras apresentaram pouco ou nenhum escurecimento de sua superfície interna, comprovando assim que estes materiais tiveram uma queima lenta com geração de brasas e poucas chamas.

2.5 **Análise por infravermelho**

Esta análise teve como finalidade avaliar a composição e os grupos funcionais das amostras antes e depois de sua queima feita no ensaio anterior. A mesma foi feita por meio da técnica de refletância total atenuada de infravermelho, a qual consiste em incidir raios de infravermelho sobre a superfície de um material e analisar a sua resposta pelos raios liberados pela amostra para o detector.

2.5.1 Materiais utilizados

Além das amostras utilizadas na análise anterior e das cinzas obtidas na mesma, foi utilizado um equipamento de análise por infravermelho.

O equipamento utilizado para emissão de raios de infravermelho e detecção da resposta do material pode ser observado na figura 16:

Figura 16 - Analisador de infravermelho PerkinElmer FT-IR Frontier



Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que o equipamento da figura 16, contém um gerador de raios de infravermelho e um detector que é acoplado a um computador com o software de controle e aquisição dos dados. Este equipamento encontra-se no Laboratório de Biomateriais do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, o qual foi utilizado com permissão da professora Dr^a. Mônica Calixto de Andrade, que é a responsável por este laboratório.

2.5.2 Métodos

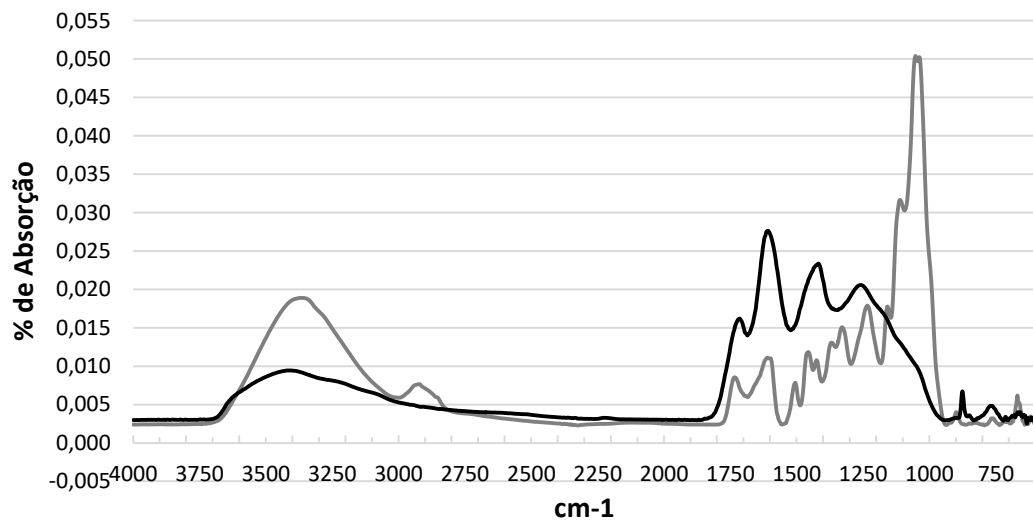
Na análise, posicionou-se a amostra dentro da câmara do equipamento, colocando-a no centro da região definida para a mesma. Em seguida, fechou-se a porta da câmara e iniciou a irradiação de raios de grande parte do espectro do infravermelho sobre a amostra. Após decorrido o tempo de aquisição dos dados, o software do equipamento gerou um gráfico de % de transmitância por comprimento de onda emitido através da amostra. Posteriormente, o gráfico obtido foi convertido no próprio software do equipamento para % de absorbância.

As etapas acima foram feitas quatro vezes para cada uma das cinco amostras antes e depois de sua queima.

2.5.3 Dados e resultados

A curvas médias das amostras antes e de depois de sua queima, assim como seus picos característicos podem ser observados, respectivamente, nos gráficos 9, 10, 11, 12 e 13 e nas tabelas 12, 13 ,14, 15 e 16:

Gráfico 9 - Curvas do briquete Tramontina



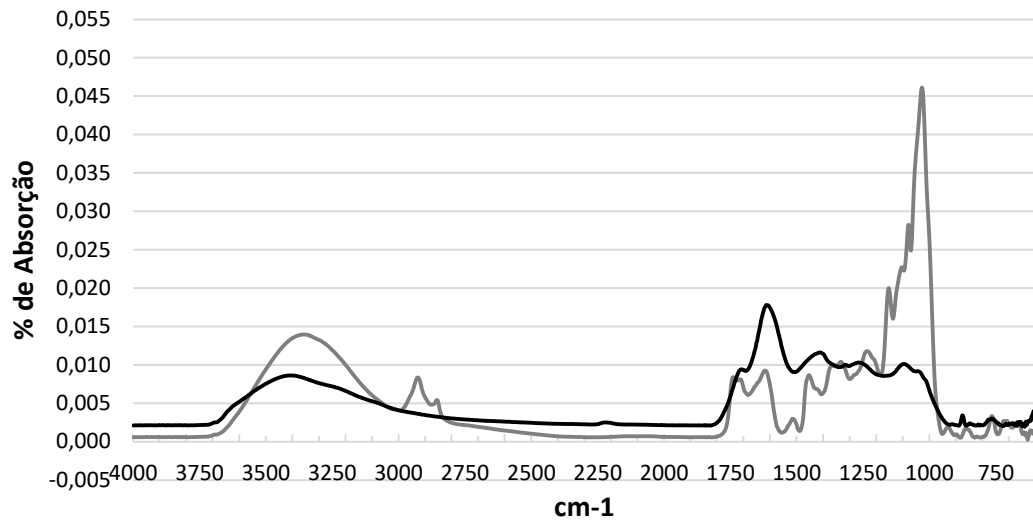
Observação: as curvas em cinza e em preto correspondem, respectivamente, a antes e depois da queima.
Fonte: O autor, 2016.

Tabela 12 - Picos das curvas do briquete Tramontina

Antes da queima		Depois da queima	
cm ⁻¹	% de absorbância	cm ⁻¹	% de absorbância
1052	0,050397	764	0,004837
1111	0,031648	876	0,006713
1158	0,017766	1257	0,020569
1234	0,017873	1418	0,023360
1329	0,015064	1608	0,027626
1368	0,013066	1715	0,016204
1425	0,010776	3405	0,009443
1456	0,011843	-	-
1505	0,007830	-	-
1611	0,011091	-	-
1734	0,008546	-	-
2923	0,007663	-	-
3369	0,018905	-	-

Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 10 - Curvas do briquete produzido no teste 4



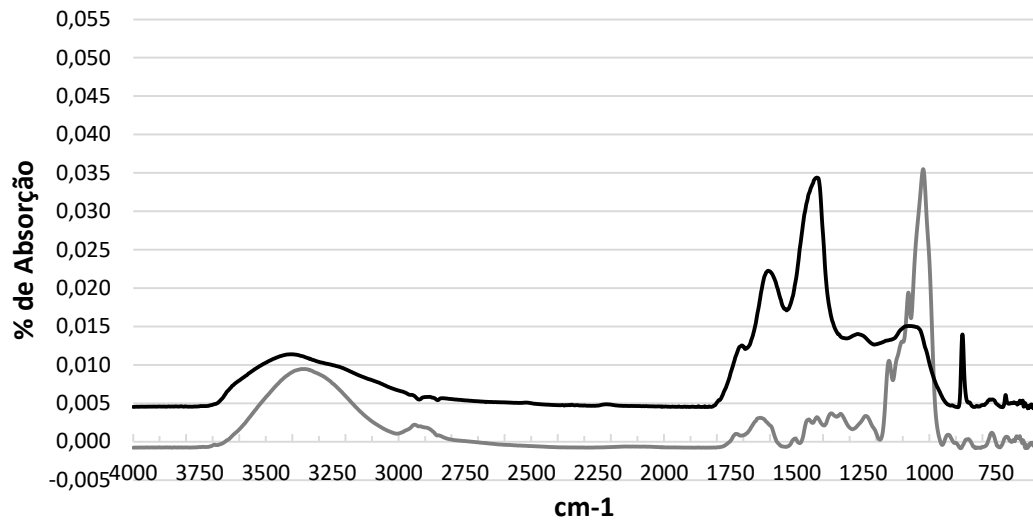
Observação: as curvas em cinza e em preto correspondem, respectivamente, a antes e depois da queima.
Fonte: O autor, 2016.

Tabela 13 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 4

Antes da queima		Depois da queima	
cm ⁻¹	% de absorbância	cm ⁻¹	% de absorbância
928	0,001845	873	0,003347
1028	0,046112	1096	0,010121
1082	0,027388	1270	0,010287
1153	0,020006	1413	0,011601
1235	0,011795	1615	0,017793
1334	0,010391	1715	0,009274
1454	0,008661	3395	0,008603
1515	0,002976	-	-
1619	0,009256	-	-
1740	0,008406	-	-
2856	0,005420	-	-
2928	0,008356	-	-
3365	0,013931	-	-

Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 11 - Curvas do briquete produzido no teste 11



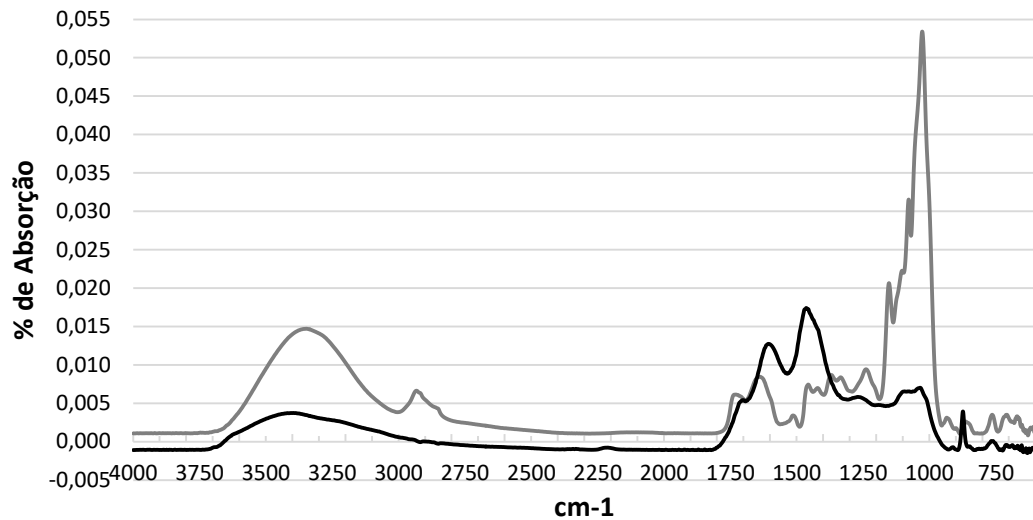
Observação: as curvas em cinza e em preto correspondem, respectivamente, a antes e depois da queima.
Fonte: O autor, 2016.

Tabela 14 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 11

Antes da queima		Depois da queima	
cm ⁻¹	% de absorbância	cm ⁻¹	% de absorbância
765	0,001158	875	0,013966
1023	0,035492	1059	0,015019
1079	0,019417	1270	0,014022
1152	0,010539	1419	0,034329
1240	0,003344	1608	0,022256
1334	0,003619	1707	0,012525
1370	0,003684	3378	0,011379
1424	0,003185	-	-
1454	0,002893	-	-
1638	0,003109	-	-
1728	0,001013	-	-
2940	0,002205	-	-
3361	0,009460	-	-

Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 12 - Curvas do briquete produzido no teste 3



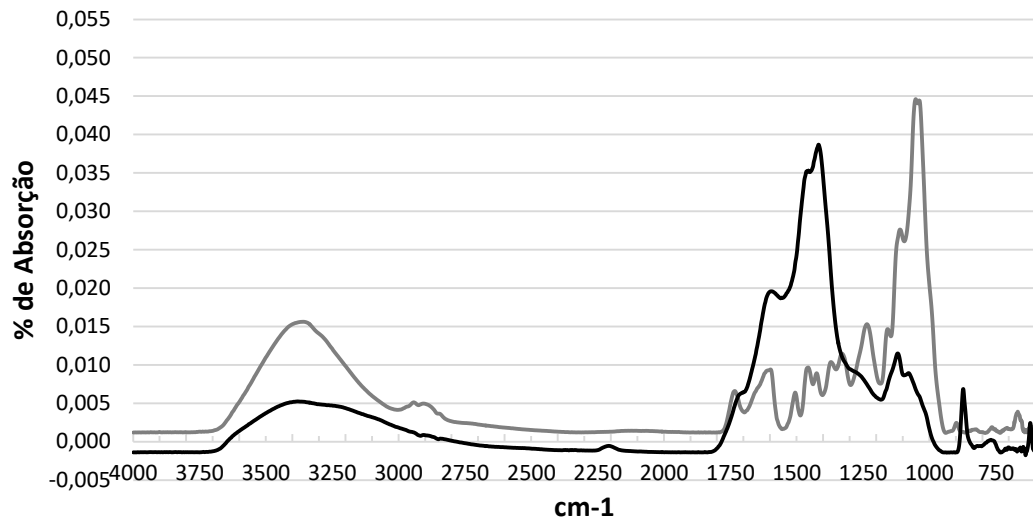
Observação: as curvas em cinza e em preto correspondem, respectivamente, a antes e depois da queima.
Fonte: O autor, 2016.

Tabela 15 - Picos das curvas do briquete produzido no teste 3

Antes da queima		Depois da queima	
cm ⁻¹	% de absorbância	cm ⁻¹	% de absorbância
1027	0,053415	873	0,003921
1078	0,031535	1035	0,007018
1152	0,020646	1269	0,005824
1239	0,009423	1457	0,017276
1334	0,008378	1607	0,012737
1370	0,008684	1704	0,005407
1421	0,006984	3397	0,003734
1456	0,007437	-	-
1513	0,003410	-	-
1638	0,008449	-	-
1731	0,006134	-	-
2933	0,006632	-	-
3347	0,014704	-	-

Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 13 - Curvas da lenha de eucalipto



Observação: as curvas em cinza e em preto correspondem, respectivamente, a antes e depois da queima.
Fonte: O autor, 2016.

Tabela 16 - Picos das curvas da lenha de eucalipto

Antes da queima		Depois da queima	
cm ⁻¹	% de absorbância	cm ⁻¹	% de absorbância
1051	0,044602	873	0,006849
1111	0,027623	1078	0,008926
1157	0,014664	1119	0,011488
1235	0,015295	1417	0,038675
1329	0,011458	1456	0,035320
1371	0,010367	1596	0,019583
1425	0,008905	3380	0,005238
1457	0,009654	-	-
1506	0,006385	-	-
1596	0,009303	-	-
1734	0,006591	-	-
2943	0,005119	-	-
3360	0,015615	-	-

Fonte: O autor, 2016.

Pode-se perceber que nas curvas antes e depois da queima, obteve-se, respectivamente, treze e sete picos característicos para todas as amostras analisadas.

2.5.4 Observações

Com a análise das curvas para as amostras antes da queima, obteve-se os grupos funcionais alcanos, álcoois, fenóis e aromáticos, tendo estes a maior probabilidade de existência nas amostras devido a repetição de três ou mais de seus picos característicos em comparação com as outras possibilidades. Sendo os grupos funcionais detectados os principais componentes da estrutura molecular da celulose, da hemicelulose e da lignina. Observa-se que nas amostras antes da queima do briquete Tramontina e da lenha de eucalipto teve-se a presença de ao menos um pico característico referente a sulfóxidos e nitritos, comprovando uma presença significativa de enxofre e nitrogênio nas referidas amostras. Condição esta que não foi demonstrada nos picos das curvas dos briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética. A situação observada anteriormente deve-se, possivelmente, a diferença de concentração de nutrientes do solo no qual as árvores das amostras se desenvolveram.

Já na análise das curvas para as amostras depois da queima obteve-se os grupos funcionais álcoois e fenóis, tendo estes a maior probabilidade de existência nas amostras devido a repetição de dois ou mais de seus picos característicos em comparação com as outras possibilidades. Sendo os grupos funcionais analisados os principais componentes da estrutura molecular orgânica após a sua combustão. Observa-se que depois da queima, os briquetes produzidos apresentaram maior possibilidade de grupos funcionais do que o briquete Tramontina e a lenha de eucalipto.

2.6 Observações finais da primeira etapa de caracterização

Como visto nas páginas anteriores, na primeira etapa de caracterização deste trabalho, realizou-se a análise de espectroscopia por raios-x, a análise de teor de cinzas, a análise térmica, a análise de composição por queima e a análise por infravermelho. Análises estas que compararam entre as amostras a presença de contaminantes, a sua composição antes e depois de sua queima, seu poder calorífico, sua eficiência energética, entre outras características. Obtendo-se assim, dados e resultados que comprovam que os briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética possuem de igualdade à superioridade nas propriedades fundamentais para um biocombustível lignocelulósico.

3 O NOVO REATOR DESENVOLVIDO

Com o objetivo de realizar testes de produção de briquetes padronizados, tanto em composição quanto em dimensões aceitas para ensaios mecânicos com madeira, foram necessárias a elaboração e a construção de um novo reator de briquetagem por batelada hermética.

Assim como a versão anterior do reator, o mesmo tem a função de servir como um recipiente/molde e pistão/êmbolo para a mistura de material, permitindo que a mesma tenha constantemente a pressão estipulada na produção. Além disso, o equipamento servirá para proteger e aquecer uniformemente a mistura de material quando ambos forem postos sobre ação de calor dentro do forno.

O equipamento funciona em sistema não contínuo por batelada, sistema esse que além de impedir a formação de ranhuras nas laterais do briquete, como observado no briquete comercial da Tramontina, possibilita o uso de partículas com uma maior granulometria, de água, aglutinantes orgânicos e aditivos para queima na mistura de material, sem impedir ou comprometer o funcionamento do equipamento ou da operação de briquetagem.

Para construção do equipamento foi necessária a compra de peças metálicas e usinagem das mesmas pelo torneiro mecânico Umberto Alan Franco, da Oficina Mecânica do Instituto Politécnico de Nova Friburgo.

As principais modificações feitas nesse novo reator, foram no comprimento e diâmetro interno do corpo do molde, sendo que o antigo possui, respectivamente, 200 mm e 86 mm, já o novo possui, respectivamente, 300 mm e 100 mm. O novo reator possui a capacidade de produzir briquetes com comprimento de até 250 mm. Além disso, ao contrário da versão anterior, a base do novo reator não é presa por parafusos e sim rosqueada por meio de uma rosca externa, o que facilita a sua retirada e fixação. Também foi feito um trabalho de pintura em todas as peças do novo reator, pintura esta resistente à oxidação e à alta temperatura, a fim de impedir a formação de óxidos de ferro na lateral do briquete produzido.

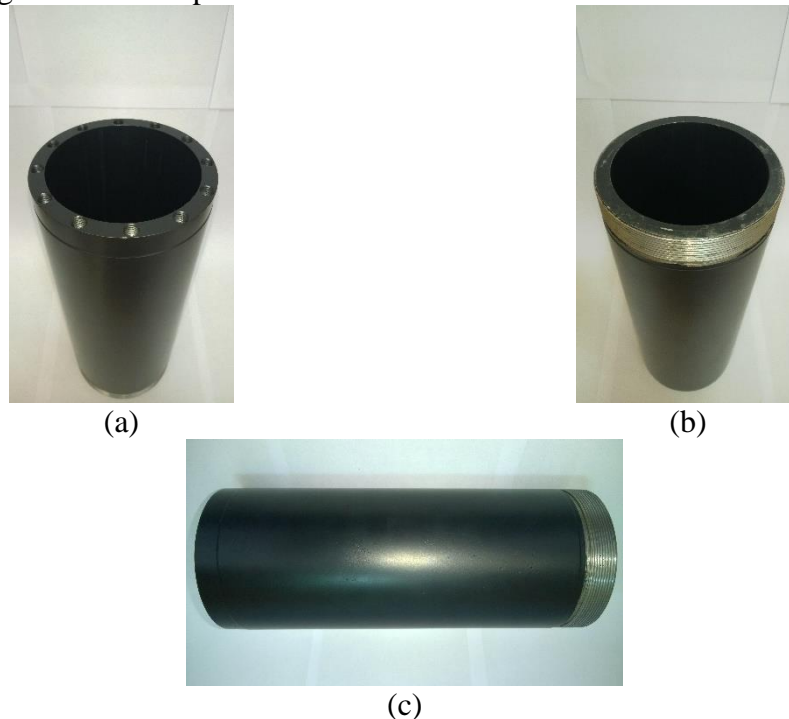
A seguir, pode-se observar a descrição das funções das peças que compõem o reator de briquetagem desenvolvido, assim como suas figuras.

3.1 O corpo do reator

O corpo do reator tem como função servir de molde para o briquete e de suporte para a base e o pistão/êmbolo do equipamento. O mesmo foi usinado com uma rosca externa na sua região inferior para fixação da base e furos equidistantes entre si na região superior, para melhor controle da altura do pistão/êmbolo e com isso uma maior precisão na pressão imposta na mistura de material.

Pode-se observar algumas imagens do corpo do reator na figura 17:

Figura 17 - O corpo do novo reator



Legenda: (a) - vista da face superior, tendo 12 furos para o encaixe do pistão/êmbolo; (b) - vista da face inferior, tendo a rosca externa para o encaixe da base; (c) - vista lateral.

Fonte: O autor, 2016.

3.2 A base do reator

A base do reator tem a função de manter a mistura de material dentro do corpo do equipamento e de ajudar o pistão/êmbolo a compactar a mesma. Além disso, durante a etapa de

retirada do briquete, a base é destravada e desacoplada do equipamento e o briquete é pressionado pelo pistão/êmbolo a sair por essa abertura.

Pode-se observar algumas imagens da base do reator na figura 18:

Figura 18 - A base do novo reator



(a)



(b)



(c)

Legenda: (a) - vista da face superior; (b) - vista da face inferior; (c) - base + corpo.

Fonte: O autor, 2016.

3.3 O pistão/êmbolo do reator

O pistão/êmbolo do reator tem a função de compactar a mistura de material e de manter a pressão desejada na produção. O mesmo também é usado para retirar o briquete produzido de dentro do equipamento.

A trava do pistão/êmbolo possui seis furos dispostos geometricamente para a passagem de três parafusos Allen M8 - 45 mm, sendo que tais furos permitem que a regulagem da altura do pistão/êmbolo seja de aproximadamente 0,35 mm para cada alinhamento entre os mesmos com os furos da face superior do corpo do reator. Além disso, a parte superior do pistão/êmbolo possui furos laterais para fixação dos bastões de apoio, que são utilizados tanto para movimentação do equipamento após a sua retirada do forno, quanto para a regulagem manual da altura do pistão/êmbolo.

Pode-se observar algumas imagens do pistão/êmbolo do reator na figura 19:

Figura 19 - O pistão/êmbolo do novo reator



(a)



(b)

Legenda: (a) - pistão/êmbolo; (b) - pistão/êmbolo + corpo.

Fonte: O autor, 2016.

3.4 Observações

A figura 20, demonstra como o reator hermético de briquetagem se encontra desmontado para a sua limpeza e montado para o seu uso. Observa-se que a precisão da usinagem feita nas peças impede que o pistão/êmbolo entre com facilidade dentro do corpo do reator.

Figura 20 - O reator de briquetagem por batelada hermética - versão 2016



(a)



(b)

Legenda: (a) - reator desmontado; (b) - reator montado.

Fonte: O autor, 2016.

4 PRODUÇÃO DE BRIQUETES PADRONIZADOS

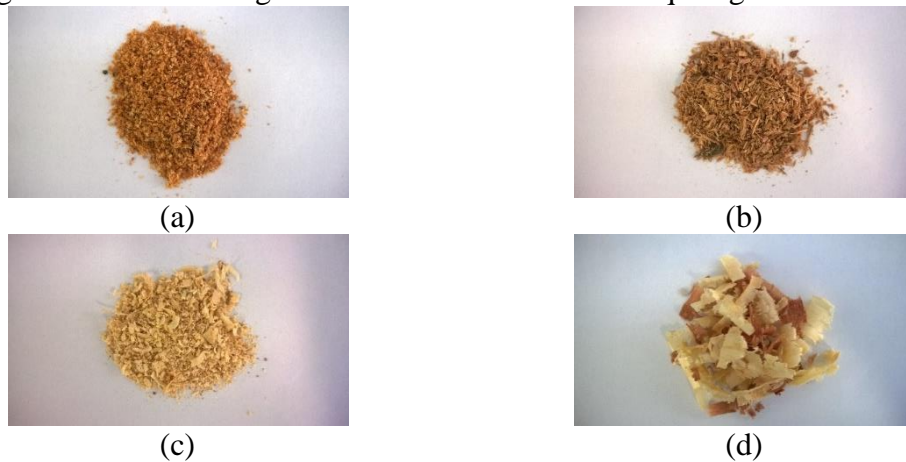
Antes de iniciar a segunda etapa de caracterização deste trabalho, fez-se necessária a produção de briquetes padronizados, tanto em composição quanto em dimensões.

4.1 Materiais utilizados

Para a composição dos briquetes foram utilizados resíduos lignocelulósicos coletados nas serrarias da região do município de Nova Friburgo, no mesmo dia em que foram rejeitados da produção das serrarias.

Pode-se observar os resíduos coletados, assim como sua granulometria na figura 21:

Figura 21- Resíduos lignocelulósicos utilizados na briquetagem



Legenda: (a) - pó de eucalipto; (b) - serragem de eucalipto; (c) - pó e serragem da mistura de maçaranduba e pinus; (d) - raspas da mistura de maçaranduba e pinus.

Observação: resíduos coletados nas serrarias da região do município de Nova Friburgo em 26/07/2016.

Fonte: O autor, 2016.

A quantidade total de resíduos lignocelulósicos coletada foi em torno de 20 kg. Além dos resíduos acima, também foram utilizados para a mistura dos briquetes arroz cozido triturado com água e óleo de fritura usado, sendo estes coletados e usados apenas no dia da produção do briquete.

Os equipamentos utilizados para a produção dos briquetes foram o novo reator de briquetagem desenvolvido, recipientes de plástico para a mistura, uma prensa hidráulica manual, um forno de resistências, uma capela química e a balança de precisão Martes Série AS5500C, que já havia sido utilizada nas análises anteriores.

A prensa hidráulica manual, o forno de resistências e a capela química que foram utilizados podem ser observados nas figuras 22 ,23 e 24:

Figura 22 - Prensa hidráulica manual
Eureka 0195



Fonte: O autor, 2016.

A prensa hidráulica manual Eureka 0195 encontra-se na Oficina Mecânica do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, a qual foi utilizada com permissão do torneiro mecânico Umberto Alan Franco, que é o responsável por esta oficina.

Figura 23 - Forno de resistências JUNG modelo JC10013



(a)



(b)

Legenda: (a) - forno fechado; (b) - forno aberto.

Fonte: O autor, 2016.

Figura 24 - Capela química



Fonte: O autor, 2016.

Os equipamentos das figuras 23 e 24 encontram-se no Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte (LF²T) do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, os quais foram utilizados com permissão do orientador deste projeto, professor Dr. Leôncio Diógenes Tavares Câmara, que é o responsável por este laboratório.

4.2 Métodos

Primeiramente, separou-se uma porção dos resíduos lignocelulósicos coletados e em seguida misturou a mesma dentro de um recipiente plástico com uma quantidade proporcional de arroz cozido triturado com água e óleo de fritura usado, de acordo com a técnica de briquetagem por batelada hermética. Após a mistura alcançar uma homogeneidade, a mesma foi colocada dentro do novo reator de briquetagem.

Em seguida, o reator foi fechado e levado até a prensa hidráulica manual Eureka 0195, sendo imposta sobre a mistura uma pressão de compactação de 1,87 MPa (1,5 toneladas). Após a estabilização da pressão sobre a mistura, o pistão/êmbolo do reator foi travado por meio de seus parafusos, possibilitando que a pressão imposta se mantivesse mesmo com o reator sendo retirado da prensa.

Enquanto as etapas anteriores eram realizadas, o forno de resistências JUNG modelo JC10013 se aquecia com uma taxa de 15 °C/min., da temperatura ambiente até a temperatura de 350 °C.

Após alcançada a temperatura desejada, colocou-se o reator junto com a mistura compactada dentro da câmara do forno de resistências e esperou por 40 minutos o aquecimento do conjunto.

Decorrido o tempo estipulado para a aglutinação da mistura, o forno se desligou e sua porta foi totalmente aberta para a saída do vapor dentro da câmara do mesmo. Em seguida, retirou-se o reator e o colocou dentro da capela química, a qual teve seu exaustor ligado para facilitar a troca térmica das peças metálicas do reator com o ambiente. Após 24 horas de resfriamento e descanso, o reator foi aberto e o briquete produzido teve sua massa e altura aferidas e catalogadas.

Estas sequências de etapas foram repetidas sete vezes até a produção de três briquetes “perfeitamente” padronizados.

Observa-se que foram utilizadas luvas de proteção contra calor durante todo o tempo em que se colocou e retirou o reator de briquetagem do forno.

4.3 Dados e resultados

Os briquetes padronizados produzidos podem ser observados na figura 25:

Figura 25 - Briquetes padronizados produzidos



Legenda: da esquerda para direita estão os briquetes produzidos no teste C, no teste E e no teste F.
Fonte: O autor, 2016.

As quantidades dos componentes utilizados na mistura de cada briquete padronizado produzido podem ser observadas na tabela 17:

Tabela 17 - Componentes da mistura dos briquetes padronizados

	Pó e serragem de eucalipto	Pó e serragem de pinus / maçaranduba	Raspas de pinus / maçaranduba	Arroz cozido triturado com água	Óleo de fritura usado
Teste C	400,86 g	400,87 g	80,41 g	531,20 g	152,09 g
Teste E	401,29 g	400,95 g	80,69 g	531,30 g	152,05 g
Teste F	401,44 g	400,34 g	80,91 g	531,20 g	152,13 g

Fonte: O autor, 2016.

Os valores da massa da mistura, massa do briquete, perda % de massa, altura e densidade aparente de cada briquete padronizado produzido podem ser observados na tabela 18:

Tabela 18 - Características gerais dos briquetes padronizados

	Massa da Mistura	Massa do Briquete	Perda % de Massa	Altura do Briquete	Densidade do Briquete
Teste C	1.565,43 g	1.381,90 g	11,72 %	204 mm	0,862 g/cm ³
Teste E	1.566,28 g	1.376,90 g	12,09 %	204 mm	0,859 g/cm ³
Teste F	1.566,02 g	1.387,00g	11,43 %	204 mm	0,866 g/cm ³

Fonte: O autor, 2016.

A perda % de massa corresponde à umidade da mistura que foi perdida durante sua aglutinação em briquete.

4.4 Observações

Como observado na figura anterior e nos dados das tabelas acima, a técnica de briquetagem por batelada hermética junto com o novo reator de bancada desenvolvido possibilitam a produção de briquetes padronizados em composição, em massa, em altura e em densidade.

5 SEGUNDA ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO

Nesta etapa, avaliou-se as propriedades mecânicas e térmicas dos briquete padronizados produzidos na fase anterior deste trabalho.

5.1 Análise mecânica

Esta análise teve como finalidade avaliar a resistência à compressão axial dos briquetes padronizados produzidos, a fim de se determinar o fator de empilhamento para estocagem.

5.1.1 Materiais utilizados

Além dos briquetes padronizados produzidos, foi utilizado um equipamento de compressão destinado tanto para concreto quanto para madeira.

O equipamento utilizado para a análise mecânica pode ser observado na figura 26:

Figura 26 - Prensa eletrohidráulica
SOLOTESTE modelo 1.501.220



Fonte: O autor, 2016.

O equipamento da figura 26 encontra-se no Laboratório de Ensaios Físicos do Instituto Politécnico de Nova Friburgo, o qual foi utilizado com permissão do professor Dr. Joaquim Teixeira de Assis, que é o responsável por este laboratório. O mesmo se utiliza de peças e garras que possibilitam as análises de compressão em dois eixos, além da análise de flexão.

5.1.2 Métodos

Primeiramente, colocou-se o briquete padronizado entre as bases de compressão do equipamento sendo posicionado no centro das mesmas e preso com as devidas peças e garras para o ensaio proposto.

Em seguida, fechou-se a porta de segurança e ativou-se o pistão de compactação do equipamento, que impunha sobre a amostra uma pressão variável com aumento constante até a ruptura estrutural do briquete. Fez-se a catalogação dos valores de carga no início da deformação e no curso máximo de compressão.

5.1.3 Dados e resultados

Os valores obtidos para a compressão axial dos briquetes padronizados, assim como o fator de empilhamento máximo, podem ser observados na tabela 19:

Tabela 19 - Dados da análise mecânica de compressão axial

	Teste C	Teste E	Teste F	Média
Carga no início da deformação	645,0 kg	682,5 kg	585,0 kg	637,5 kg
Carga máxima suportada	860,0 kg	910,0 kg	780,0 kg	850,0 kg
Fator de empilhamento máximo	466,7 briquetes	495,7 briquetes	421,8 briquetes	461,4 briquetes

Fonte: O autor, 2016.

As características dos briquetes padronizados após a análise mecânica podem ser observadas na figura 27:

Figura 27 - Características dos briquetes padronizados após a análise mecânica



Legenda: da esquerda para direita estão os briquetes produzidos no teste C no teste E e no teste F.
Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que apesar da deformação lateral obtida, os briquetes não apresentaram variação no seu comprimento após o ensaio mecânico.

5.1.4 Observações

Como observado na tabela anterior, os briquetes padronizados produzidos são capazes de suportar uma carga de mais de 450 vezes o seu próprio peso sem iniciar a propagação de trincas e deformações aparentes. Este valor lhe confere uma capacidade de manuseio, estocagem e transporte sem grandes medidas de proteção, assim como feita com as toras de lenha.

Além disso, seu fator de empilhamento com um fator de segurança de 25 vezes proporciona a estocagem de aproximadamente 18,5 briquetes sobrepostos, condição esta que apresenta uma altura de 3,77 m, altura esta superior a apresentada na estocagem de caixas nas prateleiras de armazéns e nas caçambas de caminhões.

É importante ressaltar que esta análise mecânica, foi realizada após três dias da produção do último briquete selecionado para a mesma.

5.2 Análise térmica

Esta análise teve como finalidade avaliar a variação de massa e de energia dos briquetes padronizados com o aumento de sua temperatura.

5.2.1 Materiais utilizados

A amostras utilizadas foram os resíduos dos briquetes padronizados obtidos após sua análise mecânica. Também utilizou-se o equipamento da análise térmica da primeira etapa de caracterização deste trabalho.

O aspecto das amostras utilizadas pode ser observado na figura 28:

Figura 28 - Aspecto das amostras utilizadas



Fonte: O autor, 2016.

5.2.2 Métodos

Assim como na análise térmica anterior, retirou-se pedaços de regiões distintas da amostra e colocou-os dentro de um saco plástico transparente, em seguida fez-se a trituração dos mesmos através de batidas com um martelo até que todas as partículas tivessem visualmente as mesmas dimensões. As dimensões obtidas possuíam um aspecto entre pó e grânulo.

Posteriormente, separou-se dessa mistura uma quantidade representativa da amostra e colocou a mesma na câmara de análise do equipamento. Em seguida, definiu-se no software de controle do equipamento quais ensaios seriam realizados e qual seria o fluxograma de aquecimento. Após decorrido o tempo de análise, os dados obtidos pelo software do equipamento foram catalogados e analisados. Esta sequência de etapas foi realizada uma vez para cada amostra.

Observa-se que a rampa de aquecimento e a temperatura final em todos os ensaios foi de respectivamente 5 °C/min e 550 °C.

5.2.3 Dados e resultados

Os resultados obtidos nesta análise, assim como as estimativas dos valores das principais propriedades térmicas de cada briquete, podem ser observados na tabela 20:

Observa-se novamente que o ΔH Total corresponde a variação de energia por massa de toda a reação de queima e o ΔH Exotérmico corresponde a variação de energia por massa apenas da zona exotérmica da reação de queima e é o poder calorífico estimado da amostra. A perda % de massa corresponde a massa da amostra que foi consumida apenas na zona exotérmica.

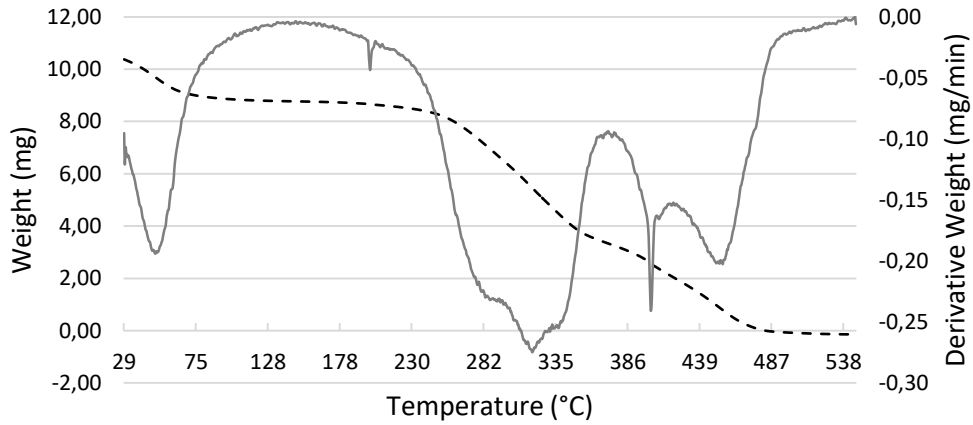
Tabela 20 - Dados da análise térmica dos briquetes padronizados

	Teste C	Teste E	Teste F	Média das curvas
Massa Inicial	10,327 mg	10,499 mg	10,293 mg	10,373 mg
% de Umidade	11,67 %	16,02 %	16,31 %	14,67 %
ΔH Total	9.912,09 J/g	10.023,03 J/g	11.016,71 J/g	17.828,71 J/g
ΔH Exotérmico	1.429,24 J/g	1.001,44 J/g	1.615,34 J/g	1.256,91 J/g
Ti Exotérmico	408,51 °C	411,12 °C	385,54 °C	392,15 °C
Tf Exotérmico	478,39 °C	468,89 °C	466,61 °C	474,52 °C
Perda % de Massa	24,60 %	19,73 %	28,63 %	26,72 %

Fonte: O autor, 2016.

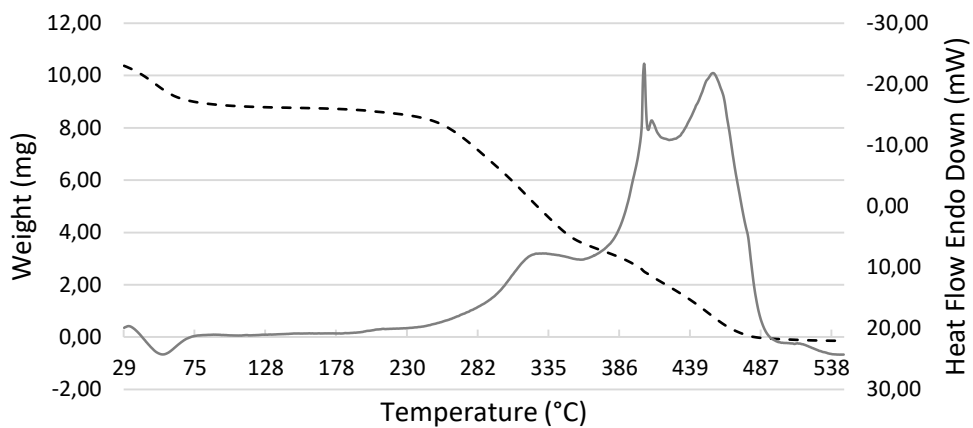
Os gráficos com as curvas de TG, DTG e DSC das médias dos valores obtidos nas curvas individuais de cada amostra, podem ser observados a seguir:

Gráfico 14 - Curvas de TG e DTG da média dos resultados



Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 15 - Curvas de TG e DSC da média dos resultados



Fonte: O autor, 2016.

Já os gráficos de TG, DTG e DSC de todas as amostras podem ser observados no Apêndice B, na página 92, desta dissertação.

5.2.4 Observações

Como observado na tabela e nos gráficos anteriores, os briquetes padronizados produzidos apresentaram na curva média um ΔH Total em torno de 17,8 kJ/g, valor este superior aos 10,8 kJ/g obtidos nos melhores resultados da análise térmica comparativa da primeira etapa de caracterização deste trabalho. No entanto, devido a quantidade de massa utilizada nesta análise ser a metade da utilizada na anterior, obteve-se uma região exotérmica de duas a três vezes menor.

Com relação aos outros parâmetros analisados, seus valores obtidos se encontram dentro da faixa já definida na análise térmica comparativa da primeira etapa de caracterização deste trabalho.

É importante ressaltar que esta análise térmica foi realizada após duas semanas da realização da análise mecânica.

5.3 Observações finais da segunda etapa de caracterização

Como visto nas páginas anteriores, na segunda etapa de caracterização deste trabalho, realizou-se a análise mecânica e a análise térmica de briquetes padronizados. Análises estas que avaliaram entre as amostras a sua resistência axial à compressão, seu poder calorífico, sua eficiência energética, entre outras características. Obtendo-se assim, dados e resultados que comprovam que os briquetes produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética podem ser padronizados nas suas características de mistura, dimensões, massa, resistência mecânica e poder de queima. Condição esta que proporciona uma uniformidade nas características dos briquetes, tendo uma capacidade “única” de planejamento das propriedades fundamentais para um biocombustível lignocelulósico.

CONCLUSÃO

Como visto na primeira etapa de caracterização deste trabalho, realizou-se a análise de espectroscopia por raios-x, a análise de teor de cinzas, a análise térmica, a análise de composição por queima e a análise por infravermelho. Obtendo-se as seguintes observações:

- Na análise de espectroscopia por raios-x, observou-se que tanto o briquete da Tramontina quanto o briquete produzido pela briquetagem por batelada hermética não apresentaram nenhum contaminante nocivo ao meio ambiente;
- Na análise de teor de cinzas, observou-se que o briquete da Tramontina gera uma quantidade maior de cinzas após a sua queima do que o briquete produzido pela briquetagem por batelada hermética;
- Na análise térmica comparativa, observou-se que os briquetes produzidos pela briquetagem por batelada hermética geram uma taxa de calor em quantidade igual ou superior durante a sua queima do que a apresentada pela lenha de eucalipto e o briquete da Tramontina;
- Na análise de composição por queima, observou-se que tanto o briquete da Tramontina, quanto os briquetes produzidos pela briquetagem por batelada hermética possuem um percentual maior de lignina do que a lenha de eucalipto;
- Na análise por infravermelho, observou-se que a composição da lenha de eucalipto, do briquete da Tramontina e dos briquetes produzidos pela briquetagem por batelada hermética são “semelhantes” antes e depois de sua queima.

Já na segunda etapa de caracterização deste trabalho, realizou-se a análise mecânica e a análise térmica de briquetes padronizados. Obtendo-se as seguintes observações:

- Na análise de mecânica, observou-se que os briquetes produzidos pela briquetagem por batelada hermética possuem uma resistência à compressão axial suficiente para o seu empilhamento, manuseio e transporte;
- Na análise térmica, observou-se que os briquetes padronizados geram uma taxa de calor “semelhante” entre si e em quantidade superior aos valores obtidos na análise térmica anterior.

É observado também, que na fase de produção dos briquetes padronizados, a técnica de briquetagem por batelada hermética junto com o novo reator de bancada desenvolvido possibilitam a produção de briquetes padronizados em composição, em massa, em altura e em densidade.

Concluindo-se assim que com os dados definidos, os resultados obtidos e as observações realizadas para cada análise, tanto na primeira quanto na segunda etapa de caracterização deste trabalho, assim como na produção dos briquetes padronizados, comprovaram a possibilidade de uso do sistema não contínuo por batelada hermética para uma “briquetagem planejada”. Briquetagem esta, que permite a escolha e o ajuste das principais propriedades para um biocombustível lignocelulósico dependendo da aplicação do produto desenvolvido. Além de produzir briquetes que apresentam um desempenho igual ou superior ao esperado para um biocombustível lignocelulósico renovável.

É importante ressaltar que atualmente o principal resíduo de madeira descartado, que não é utilizado nas operações de briquetagem ou em outro processo de reciclagem, são as cascas das toras de árvores, principalmente devido ao seu tamanho, a sua umidade e não uniformidade geométrica que apresentam. Atualmente, estas cascas de toras são queimadas apenas para a liberação de espaço dos pátios das madeireiras e serrarias, a fim de se continuar a operação produtiva.

Com o uso da técnica de briquetagem por batelada hermética é possível utilizar estas cascas de toras, necessitando apenas de uma trituração “grosseira” das mesmas, e ao combiná-las com a serragem e principalmente os “restos” de alimentos descartados diariamente pelas atividades humanas, produziríamos mais biocombustíveis renováveis com menor custo, com propriedades planejadas de maior valor e uniformidade, além de causar um maior impacto na preservação do meio ambiente.

TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de análise de calorimetria utilizando briquetes padronizados, produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, em uma bomba calorimétrica adaptada para grande massa de amostra, a fim de se obter um resultado mais representativo;
- Realizar ensaios de análise de composição dos gases emitidos pela queima de briquetes padronizados, produzidos pela técnica de briquetagem por batelada hermética, em comparação com outros biocombustíveis lignocelulósicos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C702 - C702M*: standard practice for reducing samples of aggregate to testing size. Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D1102*: standard test method for ash in wood. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D1857 - D1857M*: standard test method for fusibility of coal and coke ash. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2929*: standard test method for sulfur content of cellulosic materials by x-ray. Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D4208*: standard test method for total chlorine in coal by oxygen bomb combustion/ion selective electrode method. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D6721*: standard test method for determination of chlorine in coal by oxidative hydrolysis microcoulometry. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E29*: standard practice for using significant digits in test data to determine conformance with specifications. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E776*: standard test method for determination of forms of chlorine in refuse-derived fuel. Estados Unidos, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E870*: standard test method for analysis of wood fuels. Estados Unidos, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E871*: standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E872*: standard test method for volatile matter in analysis of particulate wood fuels. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E873*: standard test method for bulk densified particulate biomass fuels. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E955*: standard test method for thermal characteristics of refuse-derived fuel macrosamples. Estados Unidos, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E1534*: standard test method for determination of ash content of particulate wood fuels. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E1756*: standard test method for determination of total solids in biomass. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM S110*. American national standard for metric practice. Estados Unidos, 2010.

BIOMASSA – COMÉRCIO DE RAÇÕES, ENERGIA E ADUBOS LTDA (BR/SP). Thierry Constant Eddy François Marie Gauthier; Paulo Rosário Carvalho de Oliveira Costa; Luiz Antonio Stamatis de Arruda Sampaio. *Processo industrial, com baixo consumo de energia, de transformação de biomassa, com umidade relativa superior a 25% para produção de grânulos combustíveis*. BR n. PI 0700893-7 A, 08 mar. 2007, 02 jan. 2008.

BIOMASSA – COMÉRCIO DE RAÇÕES, ENERGIA E ADUBOS LTDA (BR/SP). Thierry Constant Eddy François Marie Gauthier; Paulo Rosário Carvalho de Oliveira Costa; Luiz Antonio Stamatis de Arruda Sampaio. *Processo industrial, com baixo consumo de energia, de transformação de biomassa, com umidade relativa igual ou inferior a 25% para produção de pallets combustíveis*. BR n. PI 0700892-9 A, 08 mar. 2007, 02 jan. 2008.

BRIQUETAGEM e peletização de resíduos agrícolas e florestais. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65331/1/FOLDER-Briquetagem2-2012.pdf>>. Acesso em: 05 de mar. de 2014.

BRIQUETAGEM no Brasil, A. Disponível em: <http://www.gruporenova.com.br/reciclagem_atuacao.asp>. Acesso em: 14 de ago. de 2013.

BRIQUETE. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Briquete>>. Acesso em: 12 de jul. de 2013.

BRIQUETES de biomassa e *pellets*. Disponível em: <<http://translate.google.com.br/translate?hl=pt-BR&sl=en&u=http://www.ashden.org/briquettes&prev=/search%3Fq%3Dbriquetes%2Bwoody%26biw%3D1366%26bih%3D630>>. Acesso em: 12 de julho de 2013.

ELECTRICITE DE FRANCE. Fouzi Tabet; Guillaume Foissac; Pierre Plion; Vicent Fichet. *Briquete baseado em um corpo comprimido lignocelulósico impregnado com combustível líquido*. BR n. PI 10 2012 005108-7 A2, 07 mar. 2012, 04 fev. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA AGROENERGIA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Documentos 13*: Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. ISSN 2177-4439. Brasília, DF: 2012. 132 p. Relatório técnico.

KEMMER, E.M.; PONTALTI J.R. *Método para reutilização de resíduos industriais sólidos, provenientes de madeira para uso como energia*. BR n. PI 0302261-7 A, 20 jun. 2003, 22 mar. 2005.

KLAUMANN, G.S.A. *Composto à base de resíduos de madeira*. BR n. PI 0804015-0 A2, 23 out. 2008, 22 jun. 2010.

LIGNINA. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lignina>>. Acesso em: 28 de fev. de 2014.

PRODUÇÃO de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>> Acesso em: 05 de mar. de 2014.

QUIRINO, Waldir F.; VALE, Ailton Teixeira do; ANDRADE, Ana Paula Abreu de; ABREU, Vera Lúcia Silva; AZEVEDO, Ana Cristina dos Santos. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósico. *Revista da Madeira*, n 89, p.100-106, abril 2005.

SANT'ANNA, Mikele Cândida Souza de; et al. Caracterização de Briquetes Obtidos com Resíduos da Agroindústria. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 14, n. 3, p.289-294, 2012.

SANTOS, Moacyr L. dos; LIMA, Omar J. de; NASSAR, Eduardo J.; CIUFFI, Katia J.; CAFELI, Paulo S. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTOCAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR ANÁLISE TÉRMICA. *Quim. Nova*, v. 34, n. 3, 507-511, 2011.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – SENAI/SP. Lucas Rocha Bertolo; Pamela Nóbrega de Queiróz; Renan Yuri Lino; Victor dos Reis Garcia; Wagner Augusto Vaz Júnior; Wilker Iassia Dias dos Santos. *Processo de produção de briquetes*. BR n. PI 1104560-4 A2, 02 set. 2011, 13 ago. 2013.

SILVA, D. A. da. et al. Caracterização de Biomassa para Briquetes. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p.713-722, out./dez. 2015.

SILVA, Felipe Bicalho Azeredo da.: *Desenvolvimento de uma técnica para produção de briquetes verdes com uma alta granulometria de resíduos de biomassa*. 2014. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014

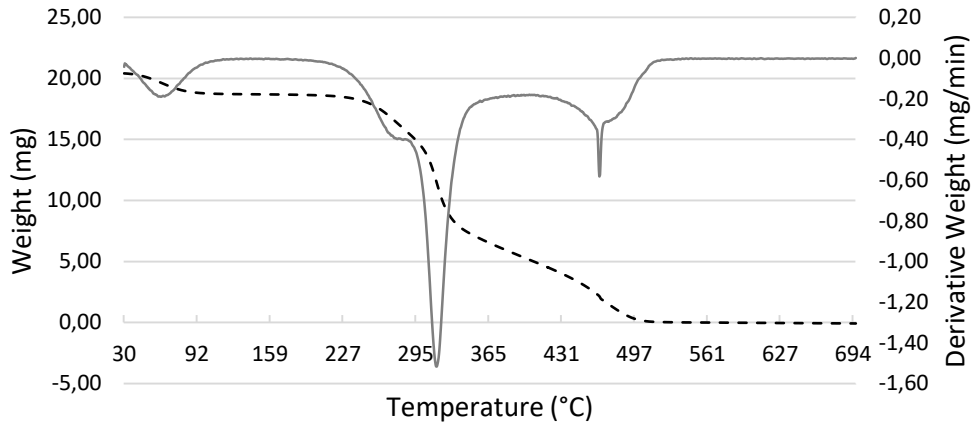
SILVERSTEIN, Robert M.; WEBSTER, Francis X. ; KIEMLE, David J. *Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos*. 7.ed. Rio de Janeiro : LTC, 2006.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Felipe Bicalho Azeredo da Silva; Philipe Lopes Jurge Tardin; Leôncio Diógenes Tavares Câmara. *Produção de briquetes de sobras de madeira (e/ou lignocelulósicos) de alta granulometria utilizando resíduos alimentícios como aglutinantes*. BR n. PI. 10 2014 025318-1, 10 out. 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE. Fernanda Rocha Moraes; Gabriel Francisco da Silva; João Bosco Ribeiro Carvalho; Maria Suzana Sila; Mikele Cândida Souza de Sant'Anna; Wilson Luciano de Souza. *Composto a partir de biomassa e glicerina*. BR n. PI 0905574-6 A2, 17 dez. 2009, 16 ago. 2011.

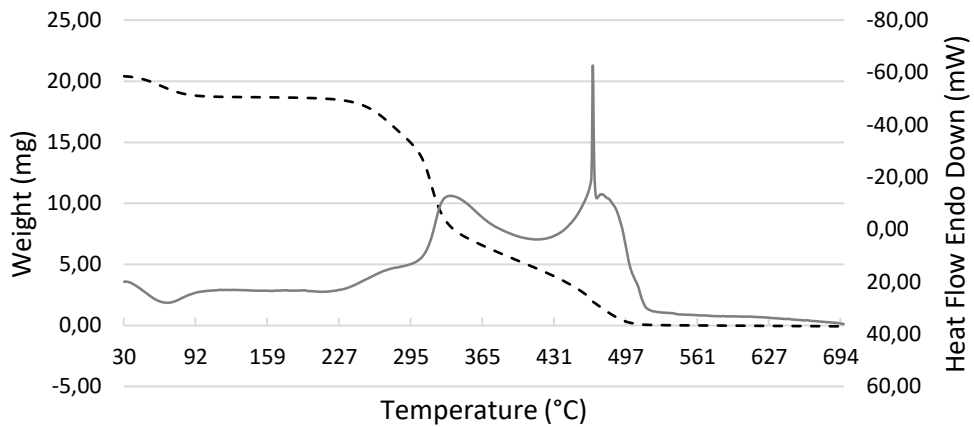
APÊNDICE A - Gráficos da análise térmica da primeira etapa de caracterização

Gráfico 16 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-Triagem



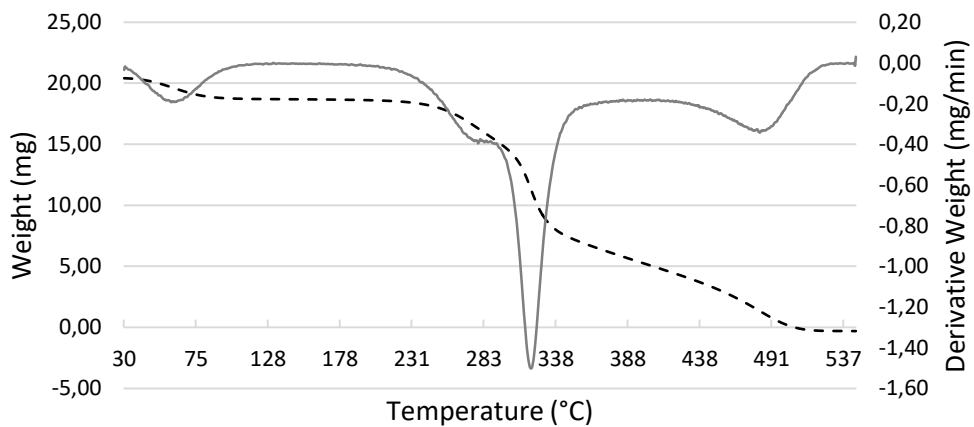
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 17 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-Triagem



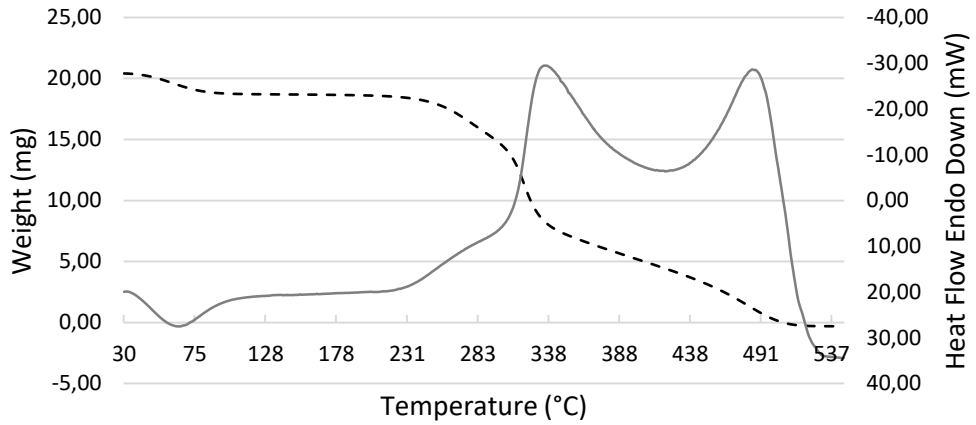
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 18 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-A



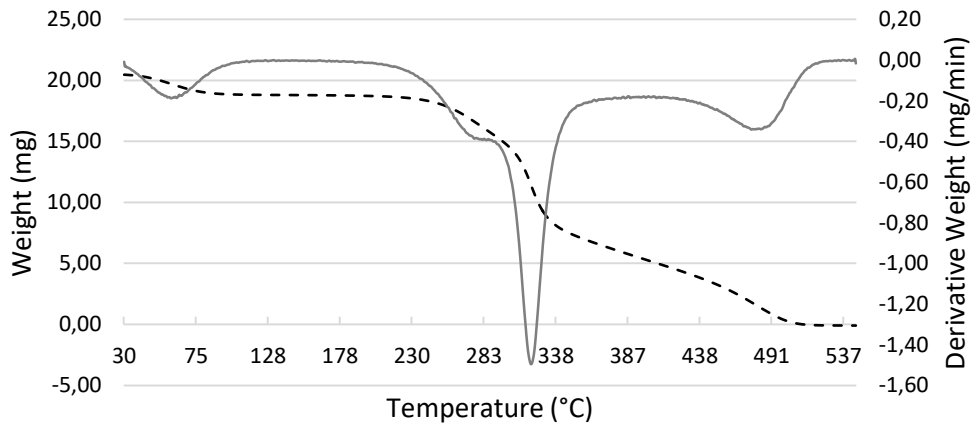
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 19 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-A



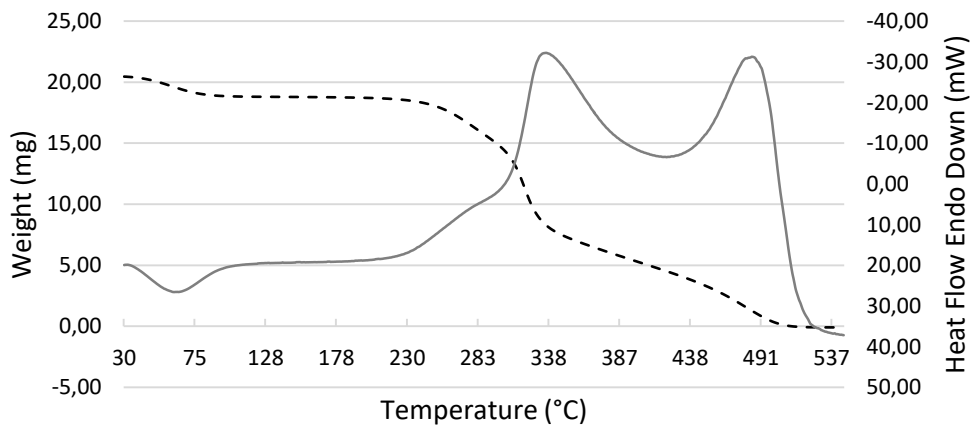
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 20 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-B



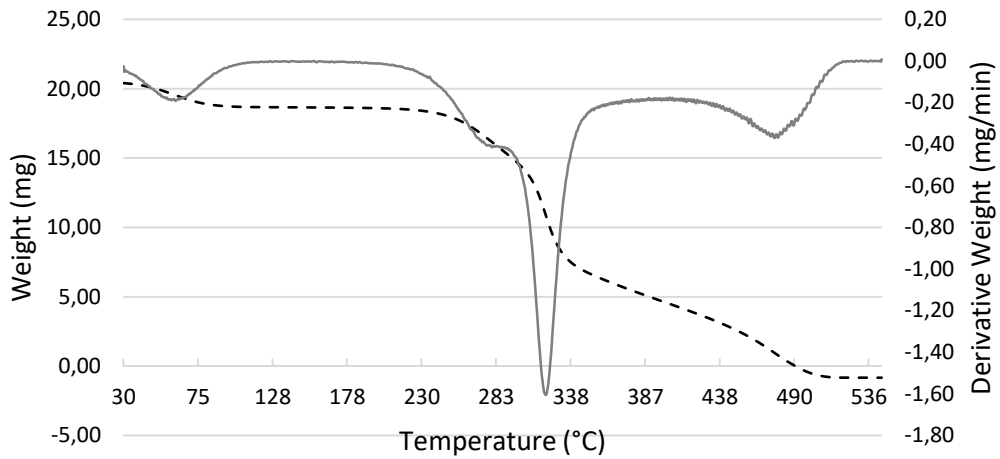
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 21 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-B



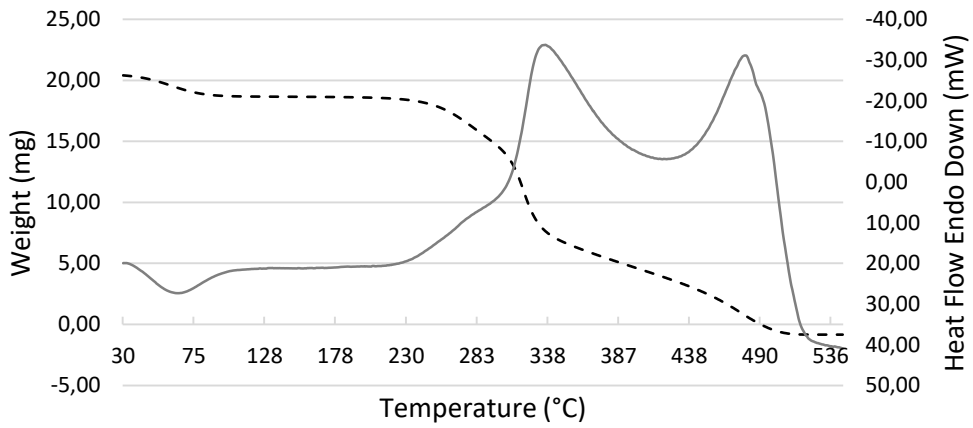
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 22 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-C



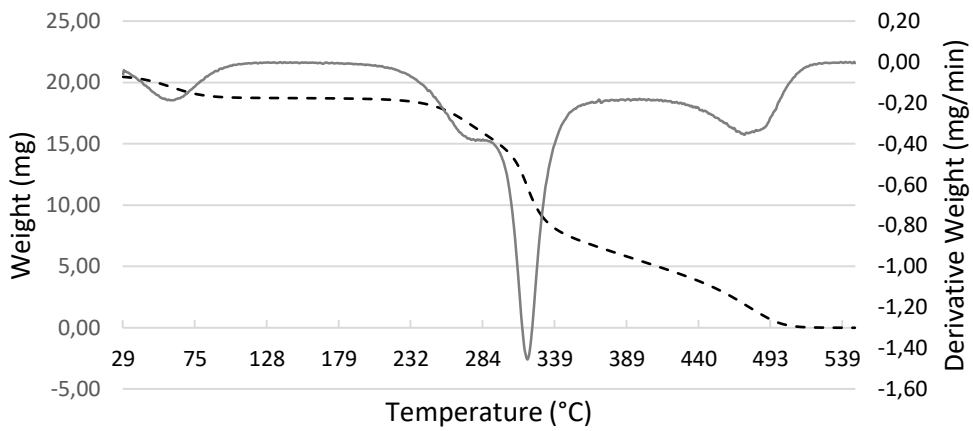
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 23 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-C



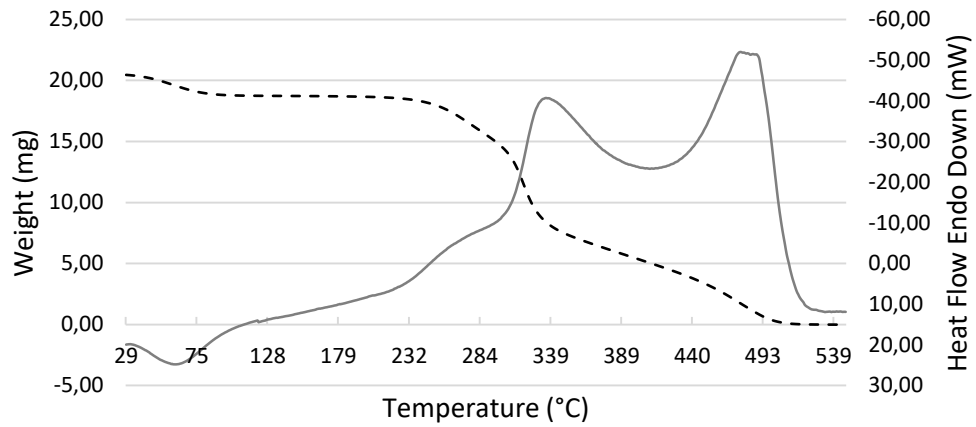
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 24 - Curvas de TG e DTG da amostra 1-D



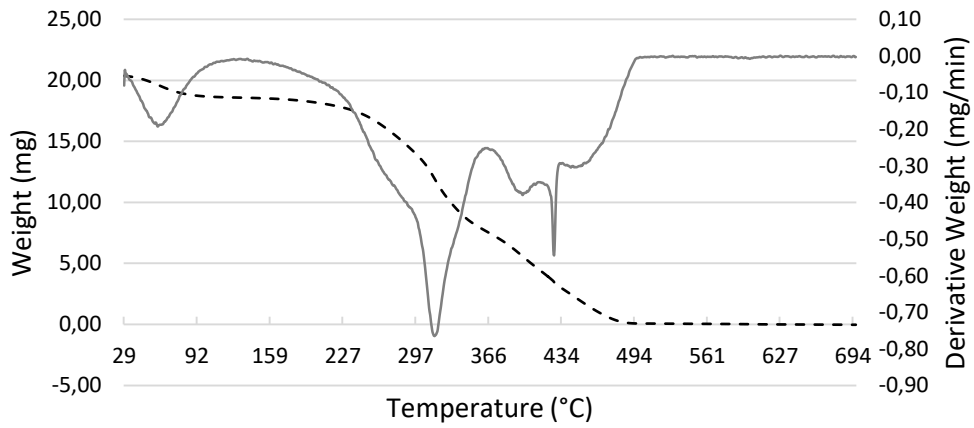
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 25 - Curvas de TG e DSC da amostra 1-D



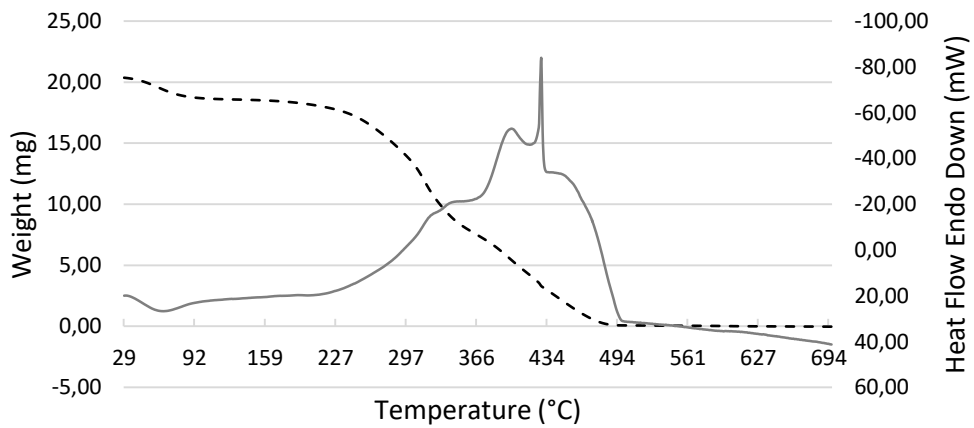
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 26 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-Triagem



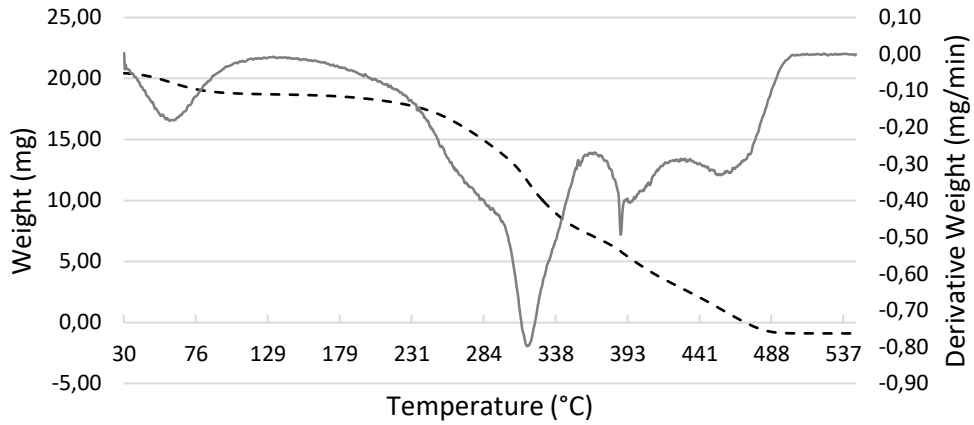
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 27 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-Triagem



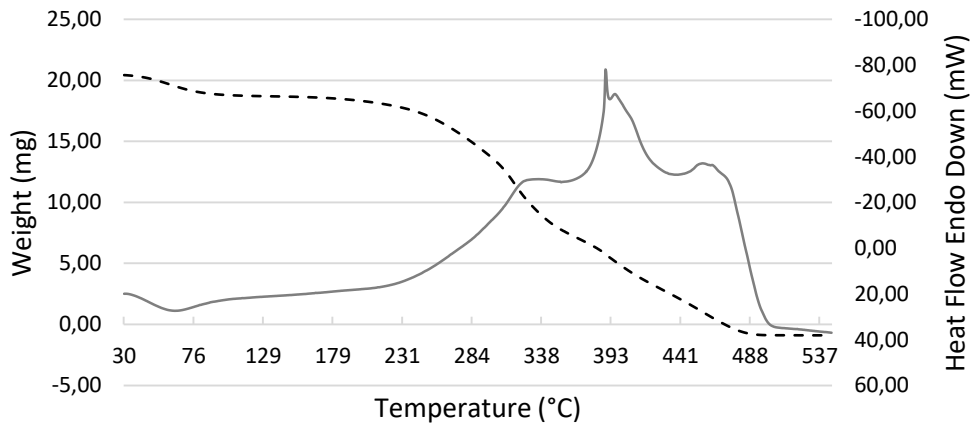
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 28 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-A



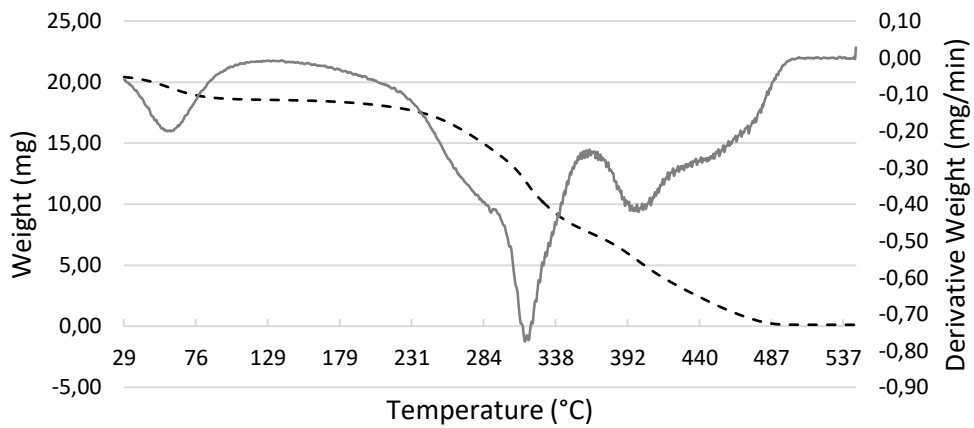
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 29 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-A



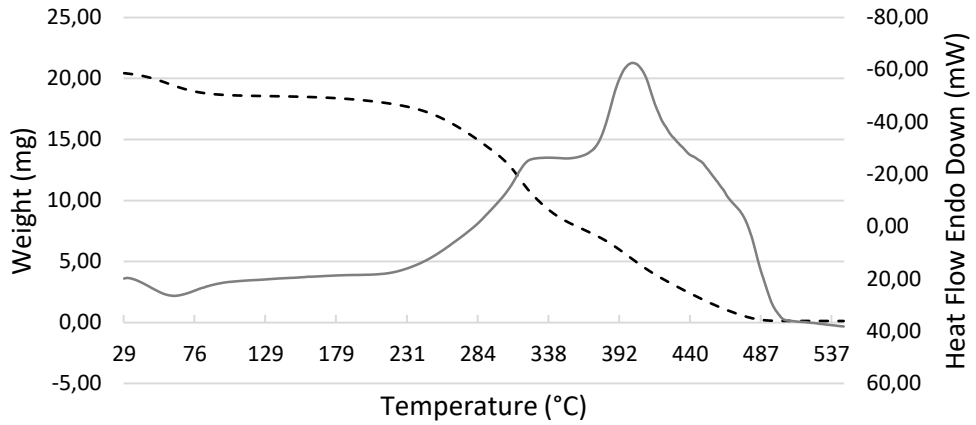
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 30 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-B



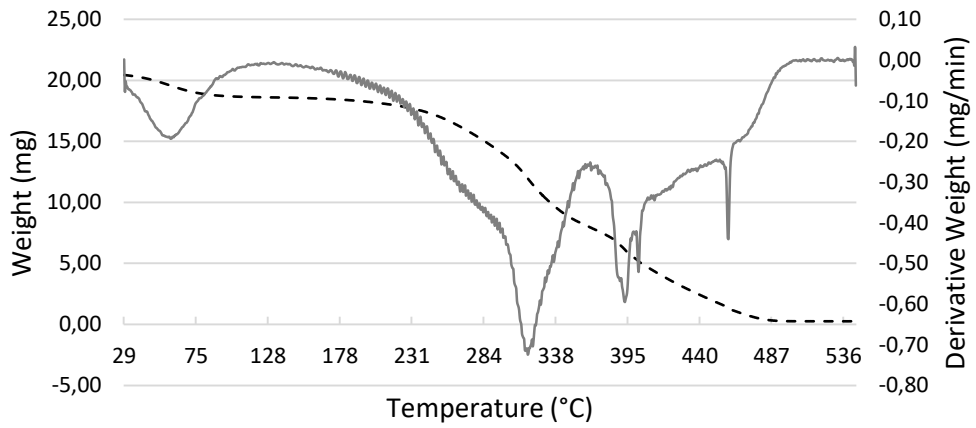
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 31 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-B



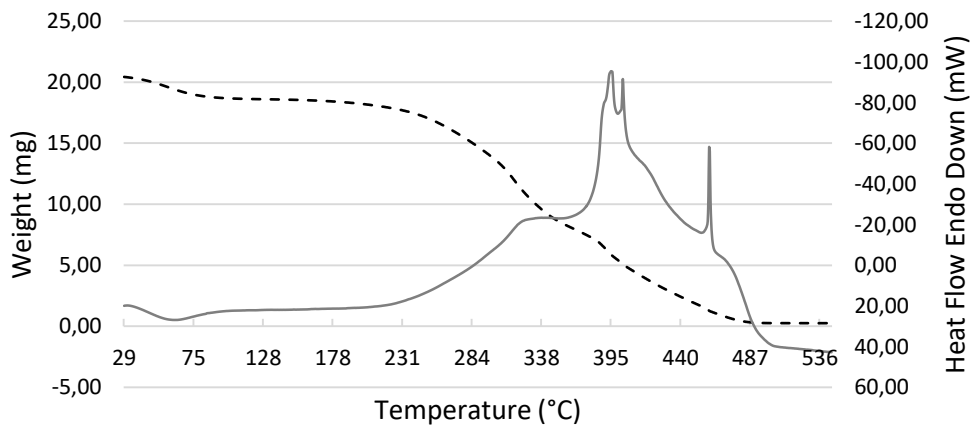
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 32 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-C



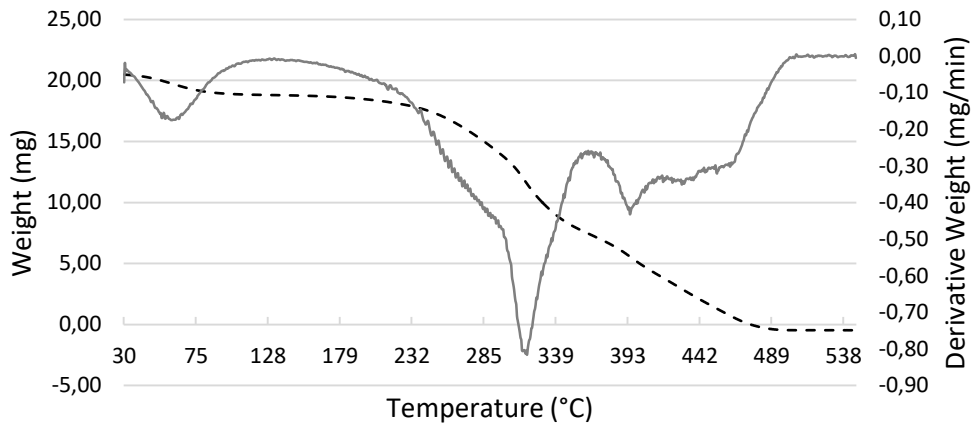
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 33 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-C



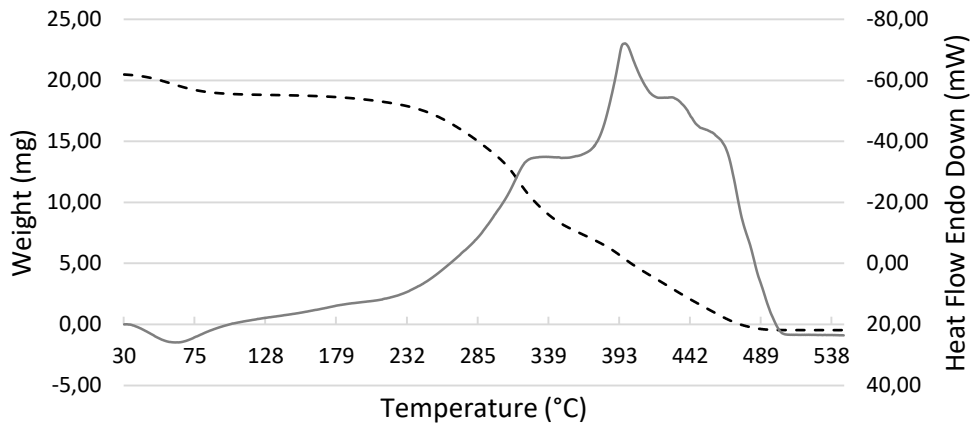
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 34 - Curvas de TG e DTG da amostra 2-D



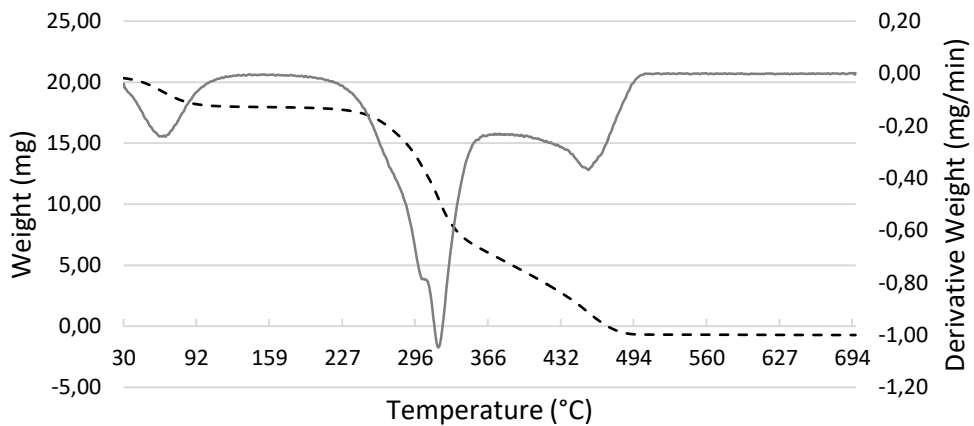
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 35 - Curvas de TG e DSC da amostra 2-D



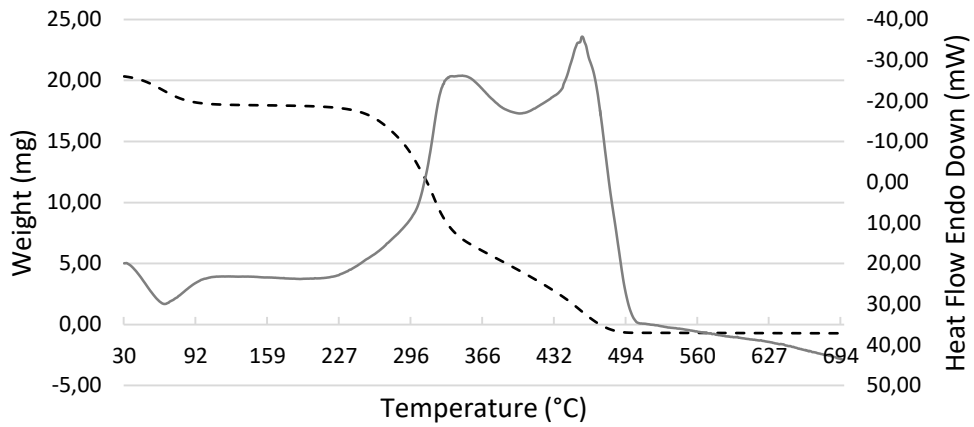
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 36 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-Triagem



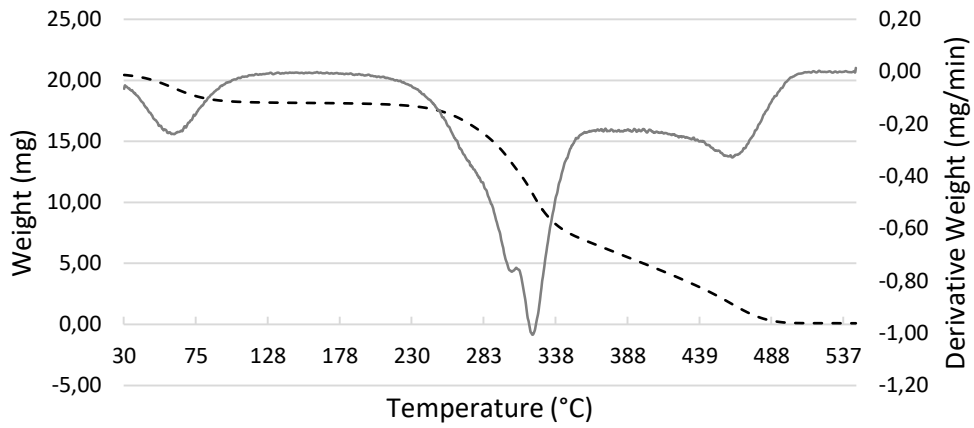
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 37 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-Triagem



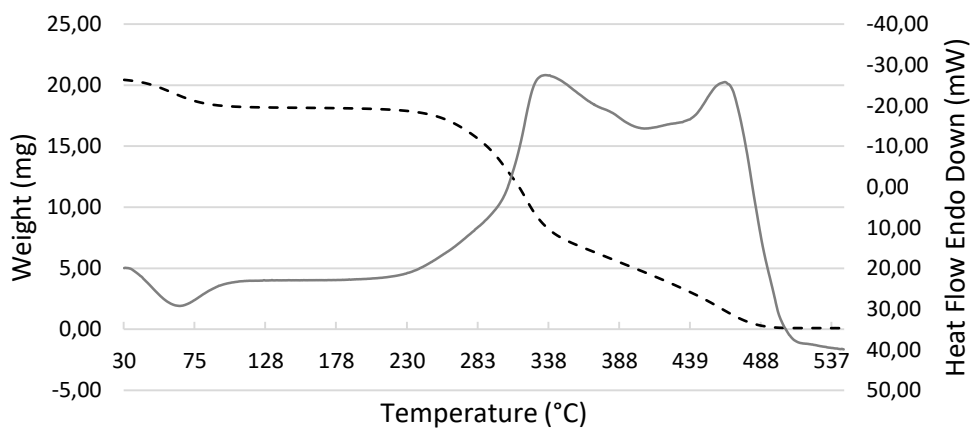
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 38 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-A



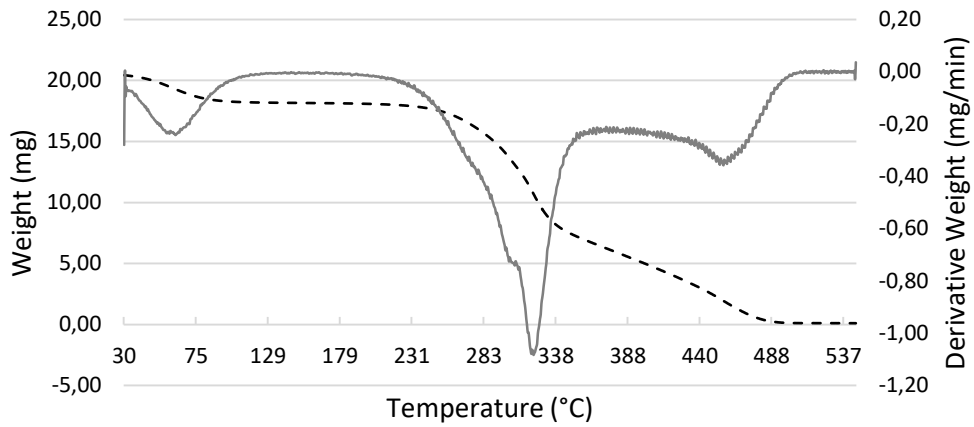
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 39 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-A



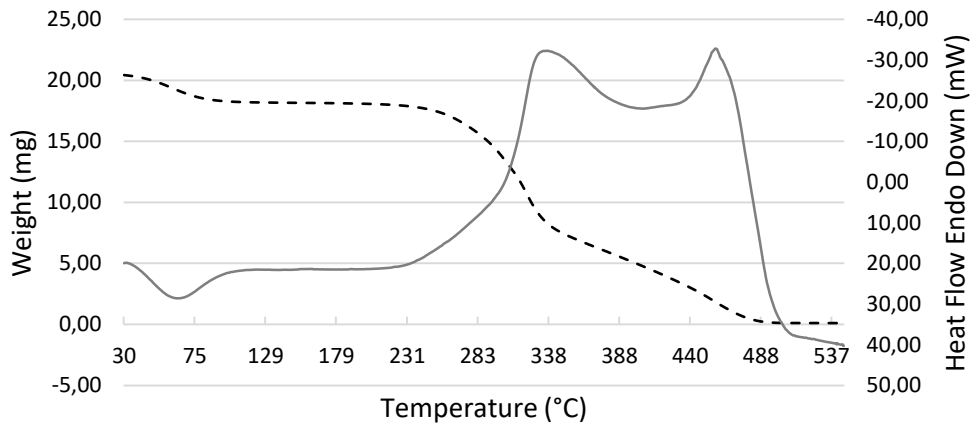
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 40 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-B



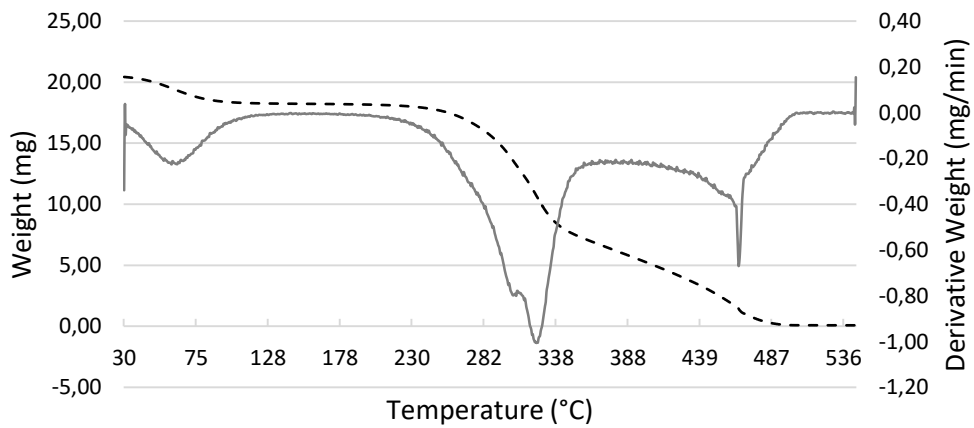
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 41 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-B



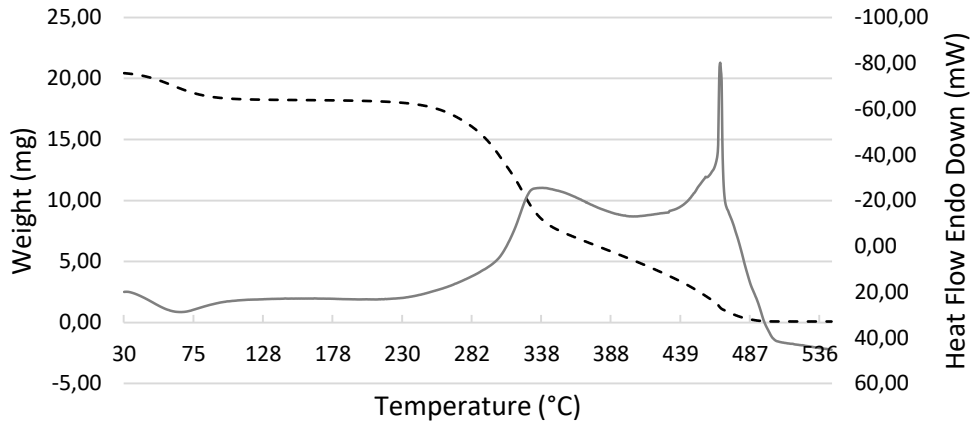
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 42 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-C



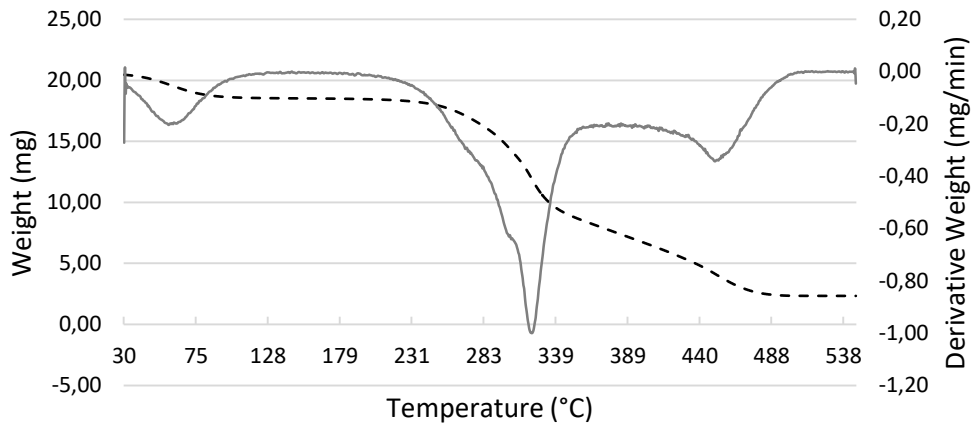
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 43 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-C



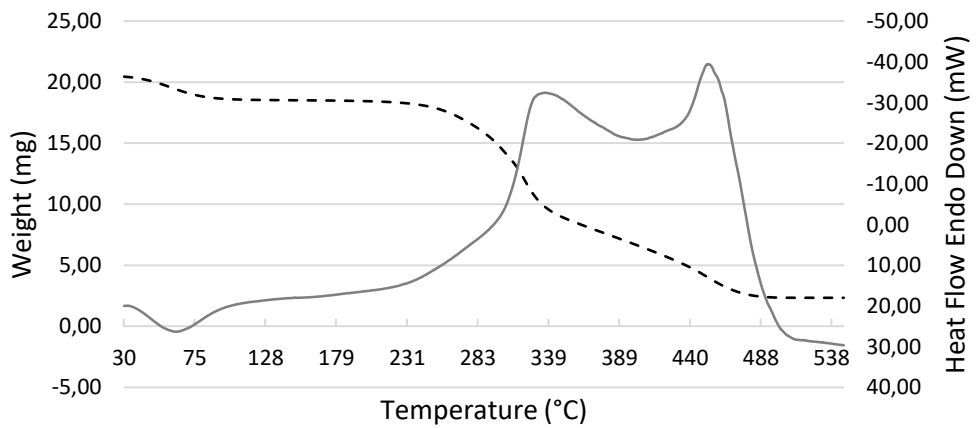
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 44 - Curvas de TG e DTG da amostra 3-D



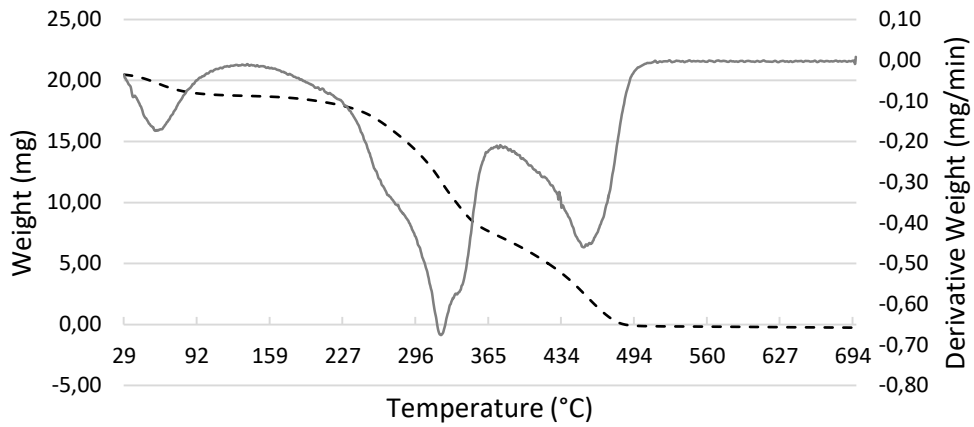
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 45 - Curvas de TG e DSC da amostra 3-D



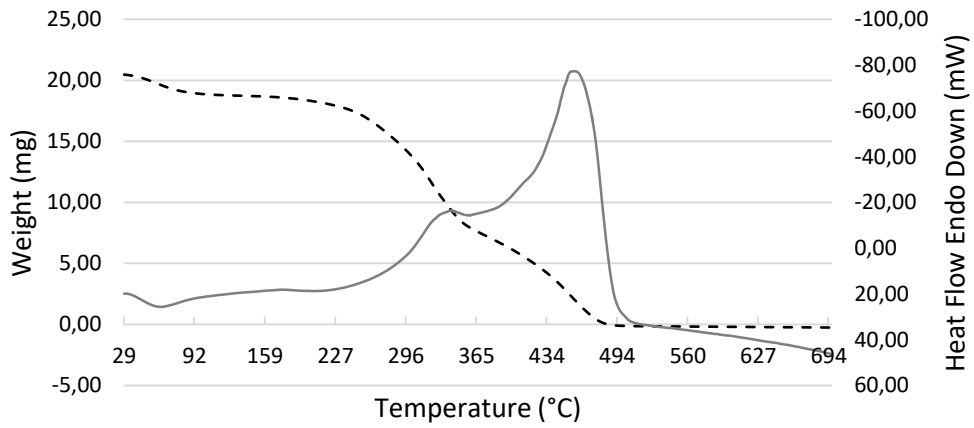
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 46 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-Triagem



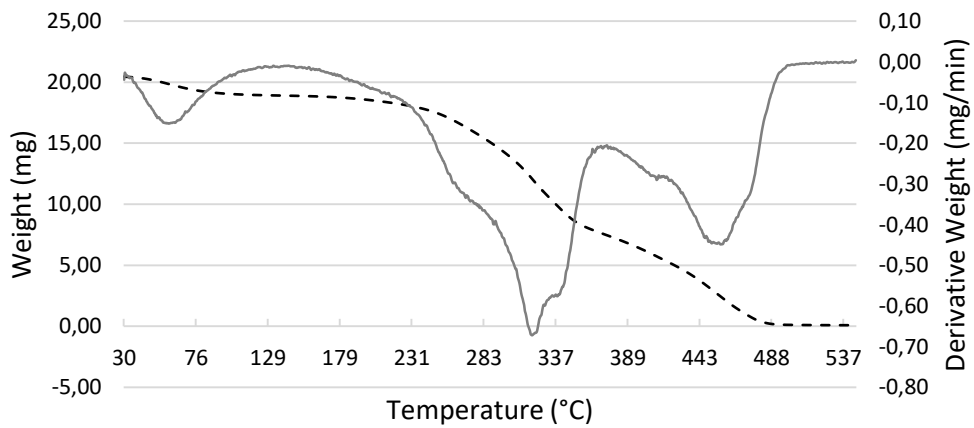
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 47 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-Triagem



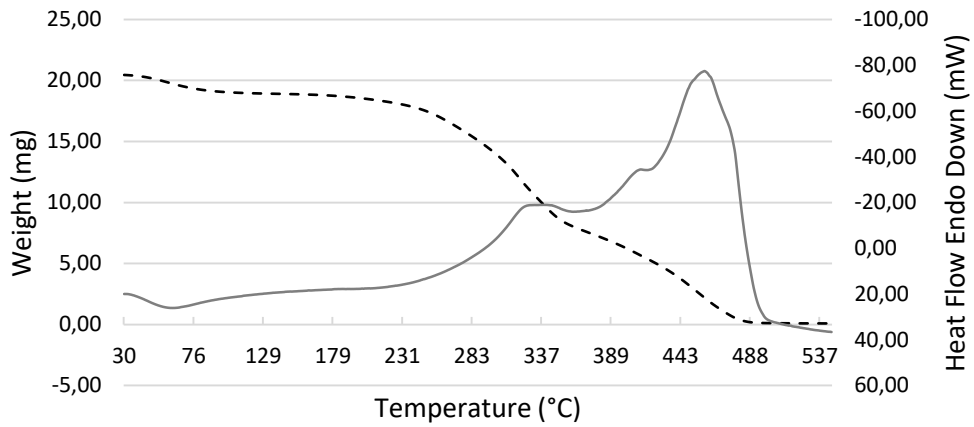
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 48 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-A



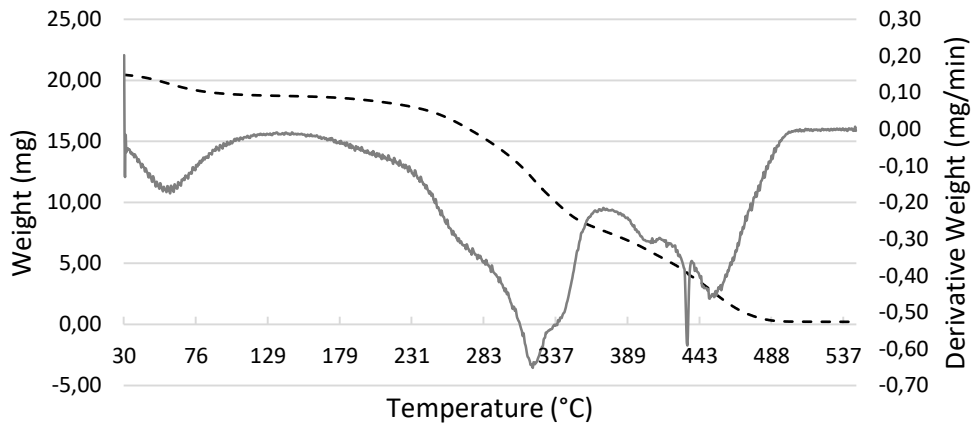
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 49 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-A



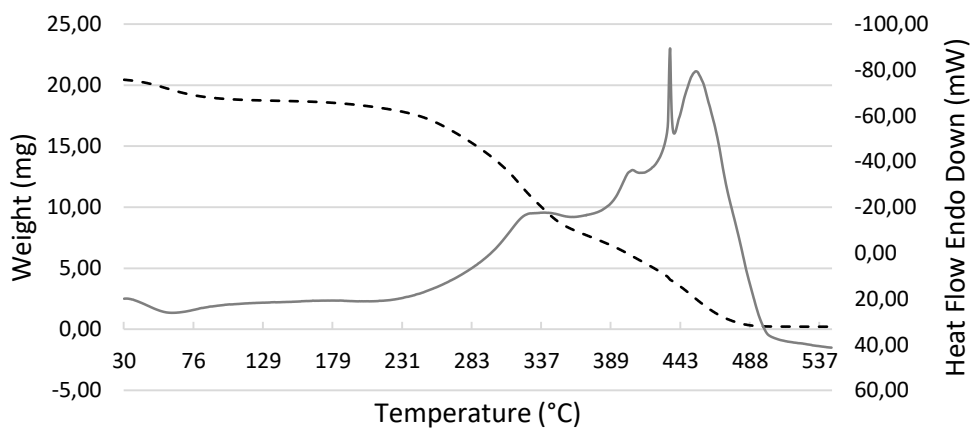
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 50 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-B



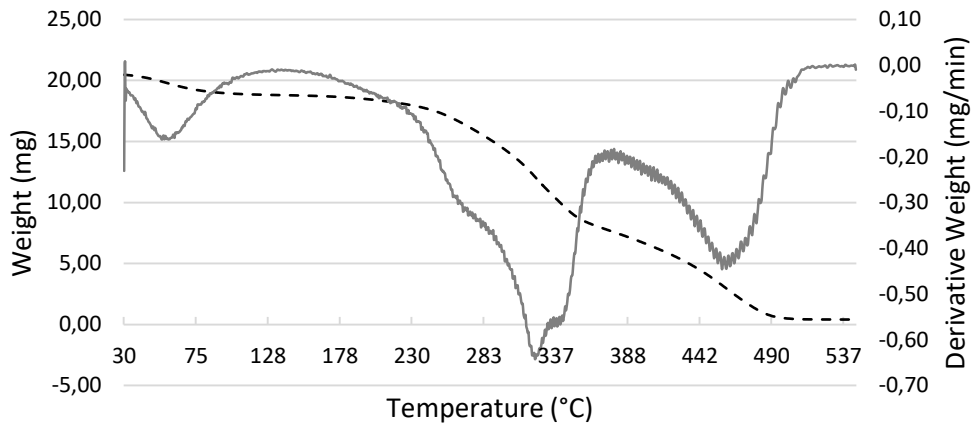
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 51 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-B



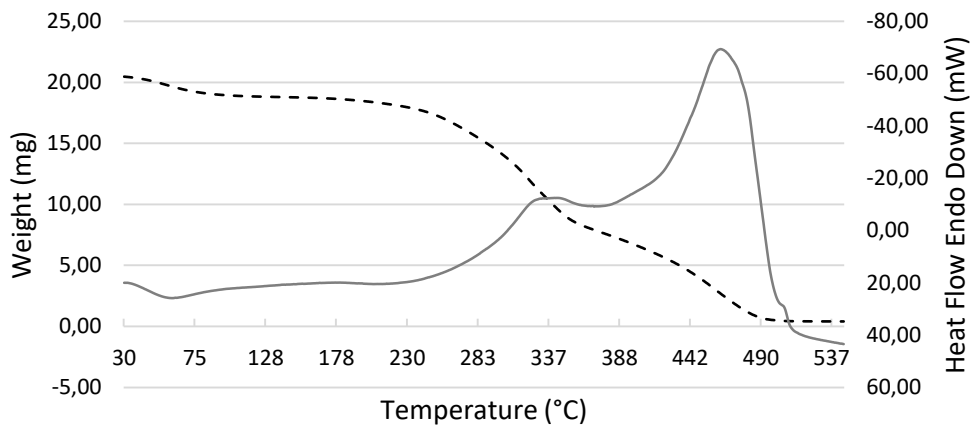
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 52 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-C



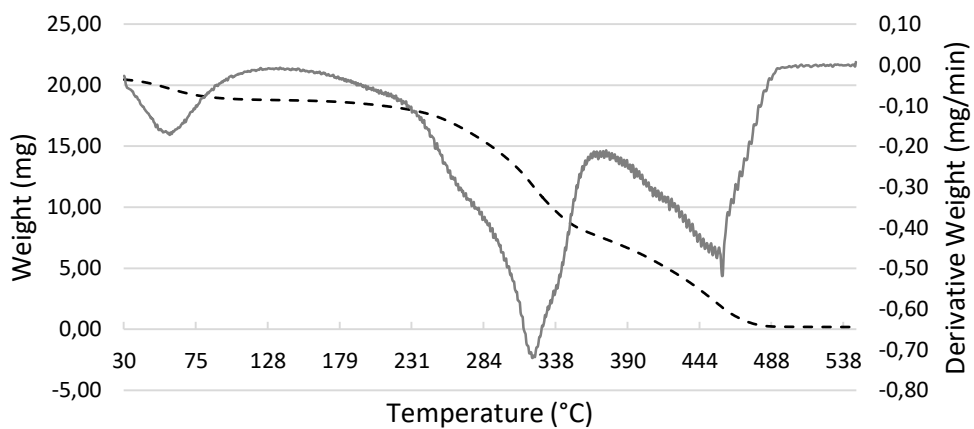
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 53 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-C



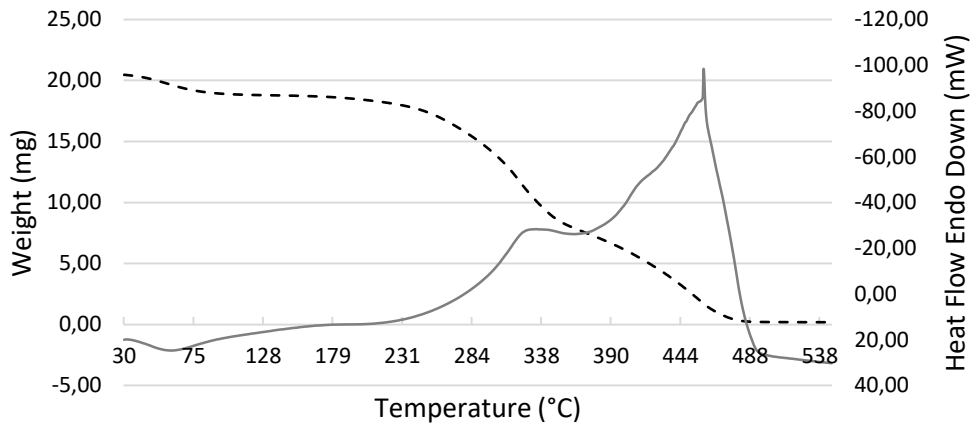
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 54 - Curvas de TG e DTG da amostra 4-D



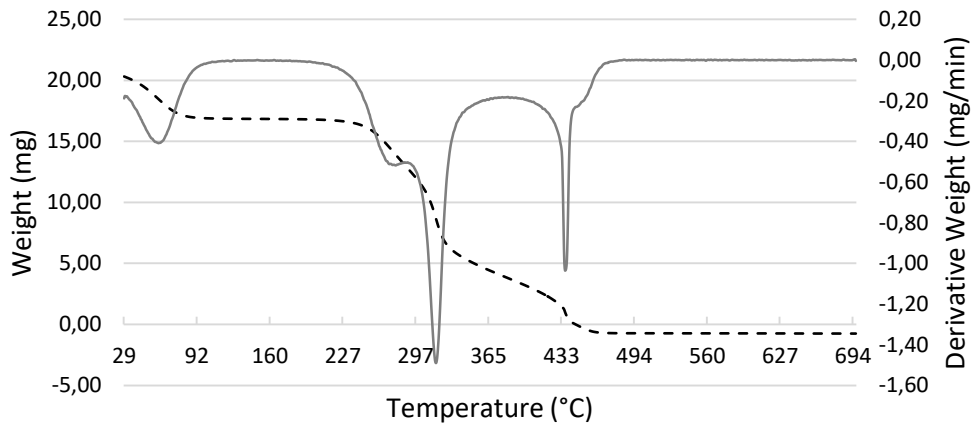
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 55 - Curvas de TG e DSC da amostra 4-D



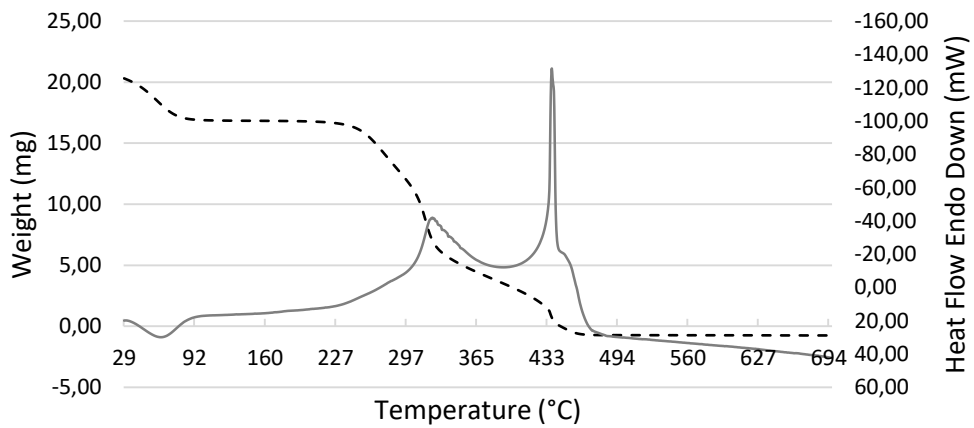
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 56 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-Triagem



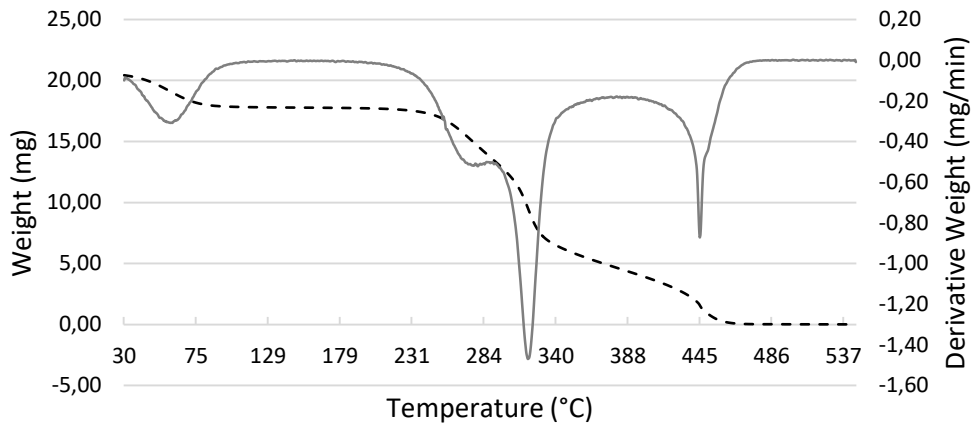
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 57 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-Triagem



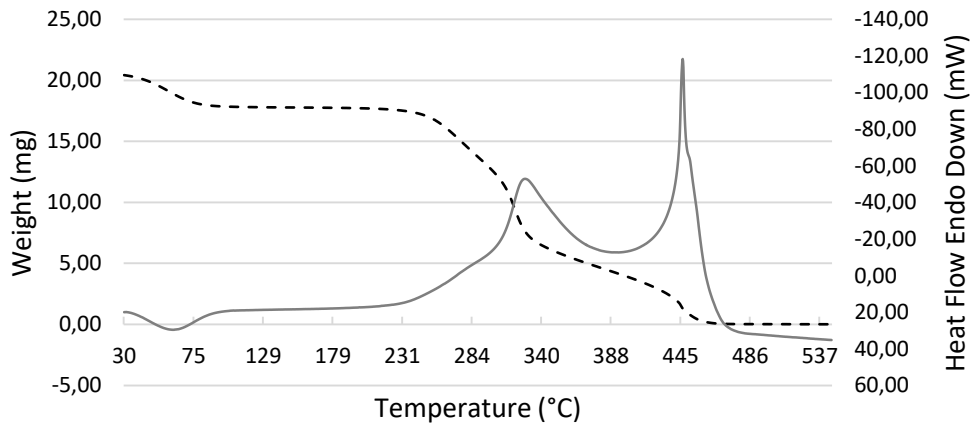
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 58 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-A



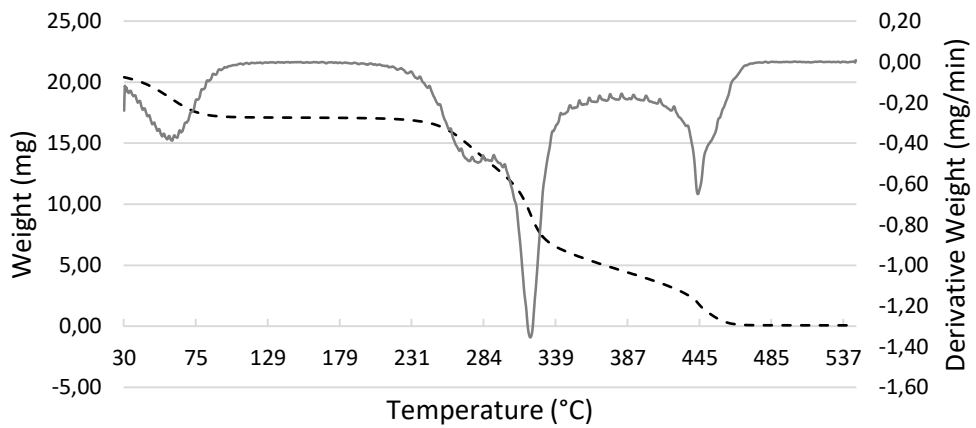
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 59 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-A



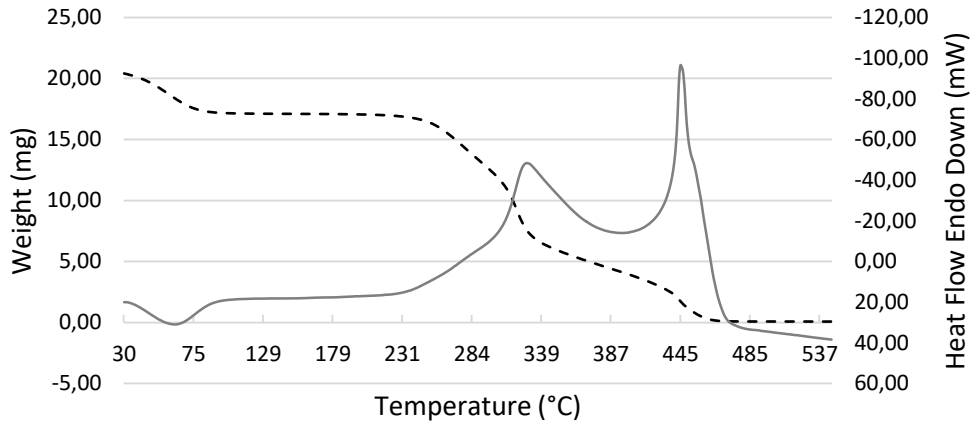
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 60 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-B



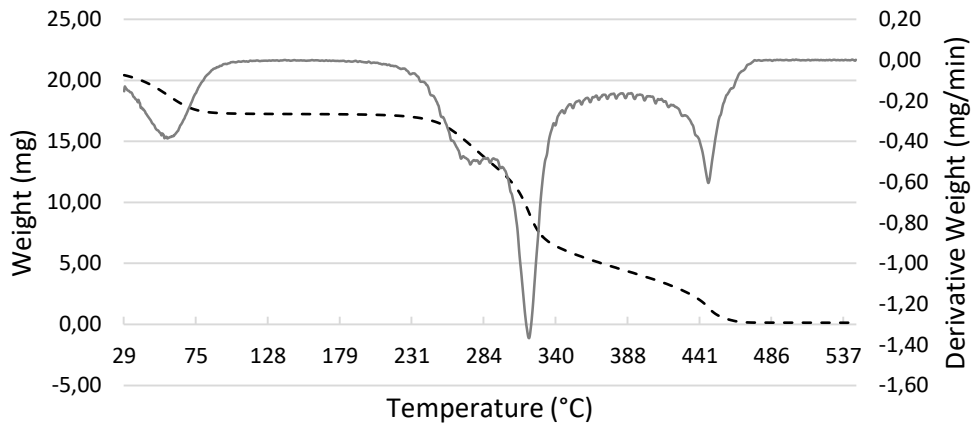
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 61 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-B



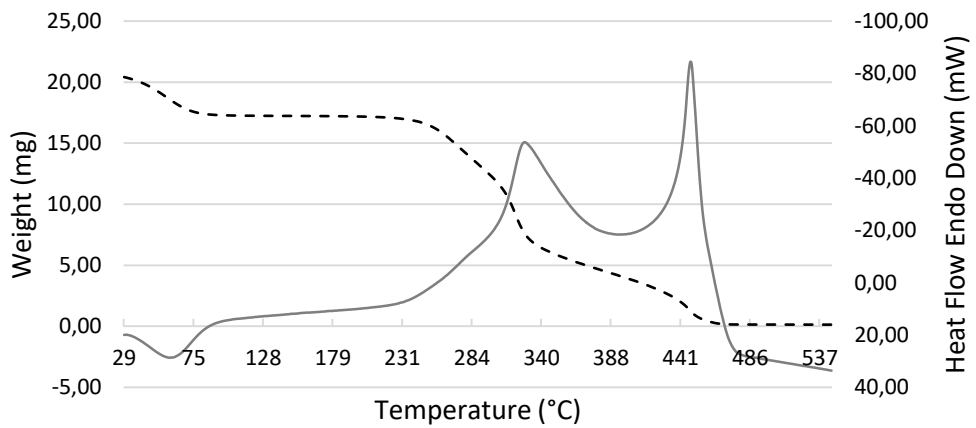
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 62 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-C



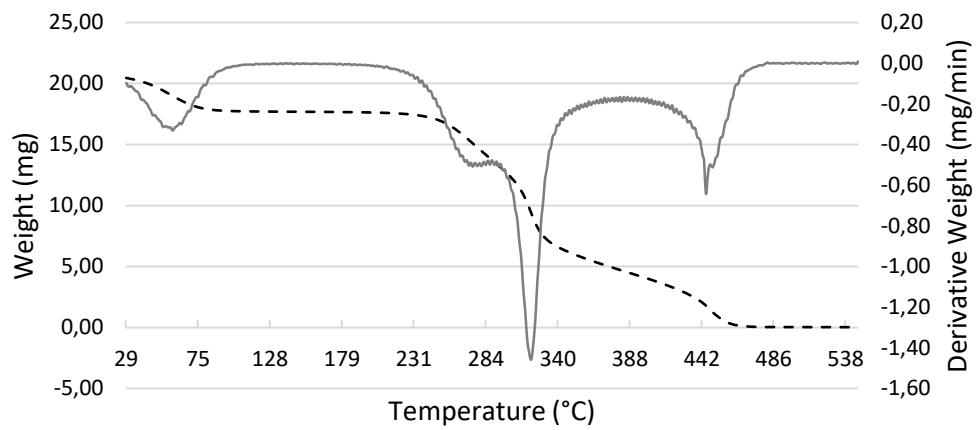
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 63 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-C



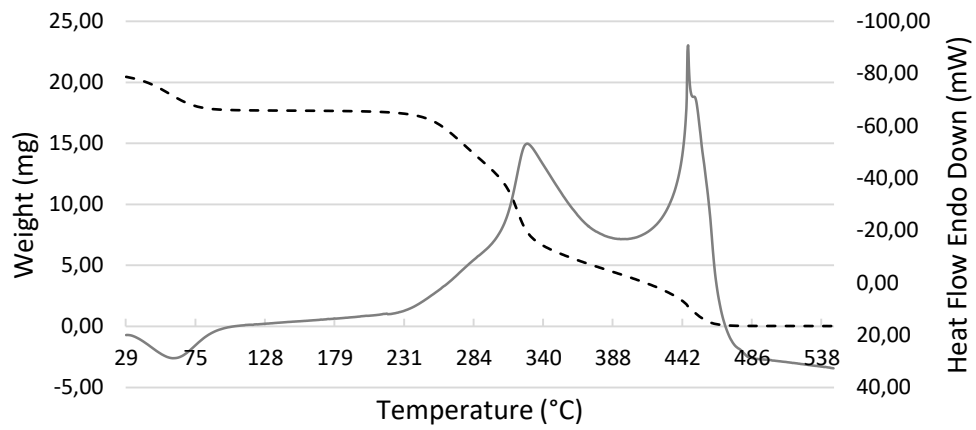
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 64 - Curvas de TG e DTG da amostra 5-D



Fonte: O autor, 2016.

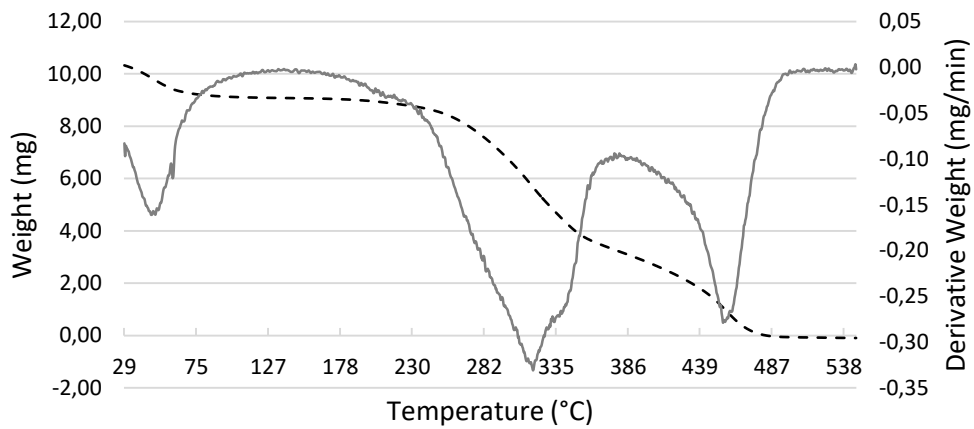
Gráfico 65 - Curvas de TG e DSC da amostra 5-D



Fonte: O autor, 2016.

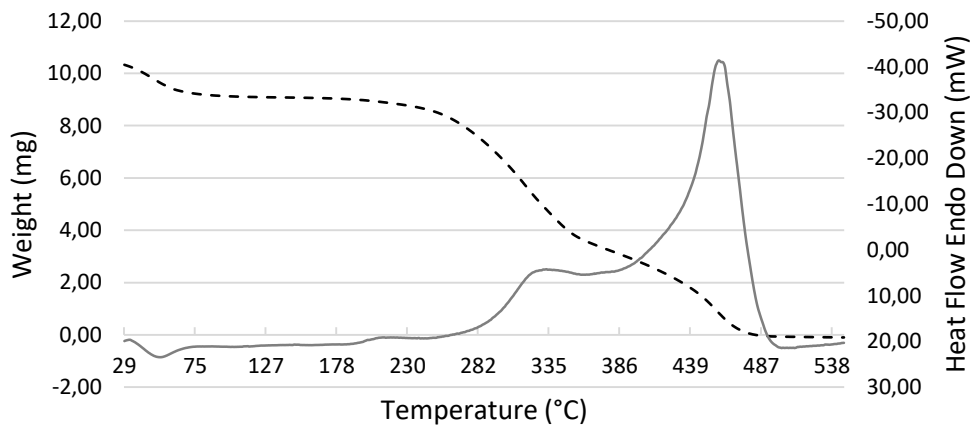
APÊNDICE B - Gráficos da análise térmica da segunda etapa de caracterização

Gráfico 66 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste C



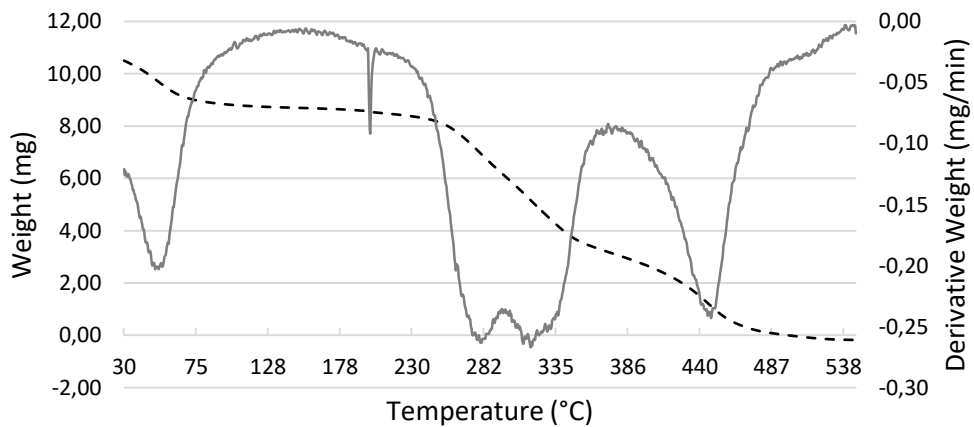
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 67 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste C



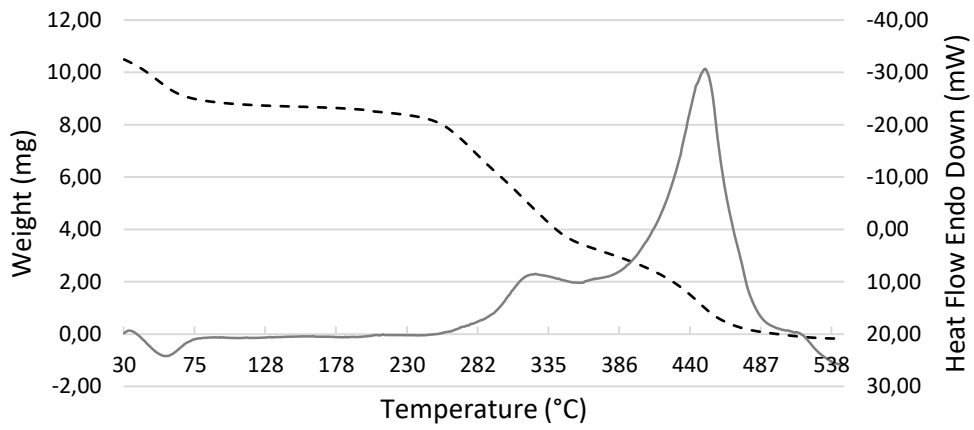
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 68 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste E



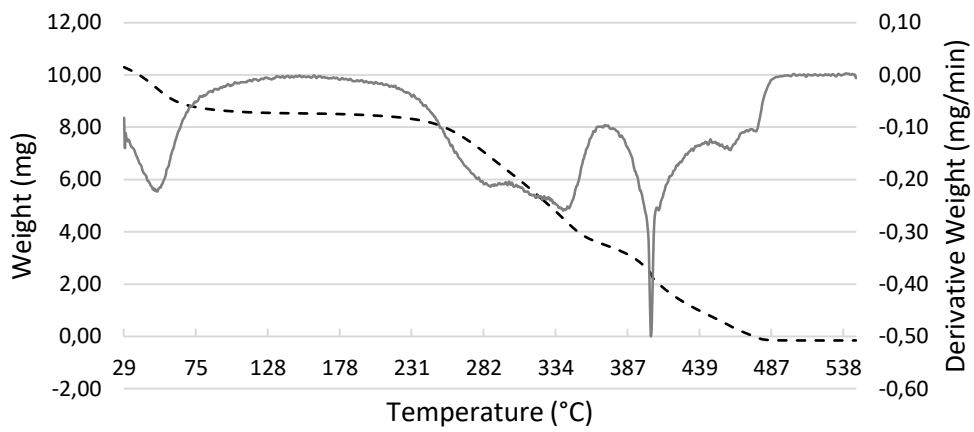
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 69 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste E



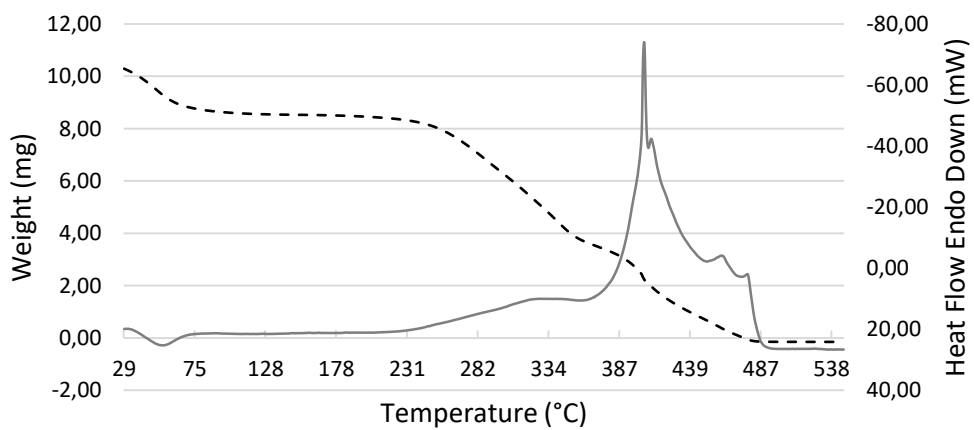
Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 70 - Curvas de TG e DTG do briquete padronizado do teste F



Fonte: O autor, 2016.

Gráfico 71 - Curvas de TG e DSC do briquete padronizado do teste F



Fonte: O autor, 2016.