



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.18.22.12-TDI

PIRÓLISE OXIDATIVA E COMBUSTÃO DA TURFA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Natalia Pellegrine Ueda

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Fernando de Souza Costa, e Ana Maura Araujo Rocha, aprovada em 21 de fevereiro de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QNQS72>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.18.22.12-TDI

PIRÓLISE OXIDATIVA E COMBUSTÃO DA TURFA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Natalia Pellegrine Ueda

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Fernando de Souza Costa, e Ana Maura Araujo Rocha, aprovada em 21 de fevereiro de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QNQS72>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ueda, Natalia Pellegrine.
Ue2p Pirólise oxidativa e combustão da turfa de São José dos Campos / Natalia Pellegrine Ueda. – São José dos Campos : INPE, 2018.
xxiv + 128 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.18.22.12-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Fernando de Souza Costa, e Ana Maura Araujo Rocha.

1. Turfa. 2. Incêndios. 3. Combustão. I.Título.

CDU 662.641:542.4



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Natalia Pellegrine Ueda**

Título: "PIRÓLISE OXIDATIVA E COMBUSTÃO DA TURFA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

**Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Combustão e Propulsão**

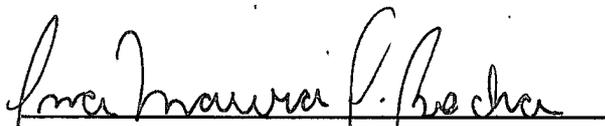
Dr. Fernando de Souza Costa



Presidente / Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

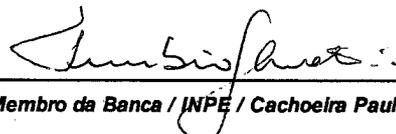
Dra. Ana Maura Araujo Rocha



Orientador(a) / PIC / Cachoeira Paulista - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

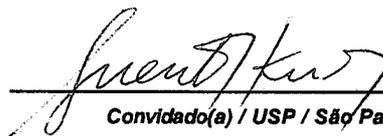
Dr. Turibio Gomes Soares Neto



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

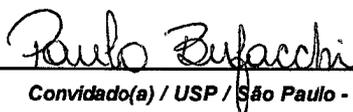
Dr. Guenther Carlos Krieger Filho



Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Paulo Roberto Bufacchi Mendes



Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 21 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a algumas pessoas que me incentivaram e foram fundamentais para mais esta etapa em minha vida.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Célia e Roberto, por todo amor e dedicação durante toda a minha vida, por serem a minha base de vida. À minha irmã, Roberta, por todo o apoio e carinho demonstrados em todos esses anos. Ao meu namorado, pelo amor e compreensão, além da ajuda quando precisei coletar amostras em campo. Agradeço a vocês por todo o incentivo e por sempre me estimularem.

Aos meus familiares, avós, tios e primos, obrigado por todo o apoio e por sempre acreditarem em mim. Tio Carlos, obrigada por me indicar o curso de mestrado no INPE, e assim ter chegado até aqui.

Ao meu orientador, Dr. Fernando de Souza Costa, obrigada por ter acreditado e confiado em mim. Por ter me orientado com toda a dedicação e paciência.

À Dra Ana Maura Araújo Rocha, por todo o apoio, orientação e amizade. Obrigada por me auxiliar em tudo que precisei e por estar sempre ao meu lado.

A todos os membros do Projeto Turfa, pela oportunidade de participar de um trabalho tão grandioso.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de concretizar um sonho, o curso de mestrado.

Aos professores do curso de mestrado na área de Combustão e Propulsão, obrigado por todos os ensinamentos que me permitiram concluir este trabalho e que também levo para a vida.

Aos integrantes dos Laboratórios de Combustão e Propulsão e de Combustão e Gaseificação, pelo auxílio em todos os momentos que

precisei, com toda a dedicação e paciência. Gostaria de agradecer ao Dr Turíbio Gomes Soares Neto por disponibilizar o Laboratório de Combustão e Propulsão sempre que precisei, e por estar sempre disposto a ajudar e transmitir seu conhecimento. Ao Dr Ely Vieira Cortez, pelo auxílio durante o trabalho experimental e sempre que necessitei.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

À CAPES, pela bolsa de estudos.

RESUMO

Os incêndios de turfa são os maiores fenômenos de combustão no planeta Terra. Este trabalho apresenta um estudo da pirólise e da combustão de amostras de turfa do município de São José dos Campos, no vale do Rio Paraíba do Sul, em São Paulo. Foram coletadas amostras, classificadas e determinadas as suas características físico-químicas. Foram analisados os processos de pirólise oxidativa e de combustão por análise termogravimétrica (TGA) e por calorimetria exploratória diferencial (DSC). Foram efetuadas análises da pirólise e da queima da turfa em calorímetro cônico, determinando-se emissões, taxas de queima e taxas de liberação de calor. Amostras de turfa fibrosa, fibrosa/hêmica e de solo turfoso foram obtidas, com valores de umidade variando de 58 a 90 % em base úmida. O teor de umidade depende do tipo de turfa, do local e do período da coleta das amostras. As densidades médias aparentes calculadas foram 0,541, 0,585 e 0,527 g/cm³ e as densidades da fase sólida medidas foram 1,753, 2,023 e 1,559 g/cm³, respectivamente, para as amostras de turfa fibrosa, fibrosa/hêmica e de solo turfoso. Os poderes caloríficos superiores medidos foram de 15171, 6643 e 16800 J/g, obtidos em calorímetro convencional, e de 15663, 5428 e 13581 J/g, obtidos por DSC, respectivamente, para as amostras de turfa fibrosa, fibrosa/hêmica e de solo turfoso. Os valores médios encontrados de energia de ativação dos processos de pirólise oxidativa e de combustão foram, respectivamente, 56461, 55594 e 48400 J/mol para as turfás fibrosa, fibrosa/hêmica e para o solo turfoso. Durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico observou-se a predominância do processo de incandescência e verificaram-se valores máximos de emissão de 235 ppm de CO, 1346 ppm de CO₂, 3,1 ppm de NO_x e de 142 ppm de UHC no caso da turfa fibrosa, e 127 ppm de CO, 1135 ppm de CO₂, 5,4 ppm de NO_x e de 72 ppm de UHC, no caso do solo turfoso. As taxas máximas de liberação de calor calculadas foram 1245 kW/m² e 1206 kW/m², para amostras de turfa fibrosa e de solo turfoso, respectivamente.

Palavras-chave: Turfa. Incêndio. Combustão.

OXIDATIVE PYROLYSIS AND COMBUSTION OF THE PEAT OF THE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

ABSTRACT

Peat fires are the largest combustion phenomena on Earth. This work presents an experimental study of the pyrolysis and combustion of peat samples collected in the municipality of São José dos Campos, in the Paraíba do Sul river valley, SP, Brazil. Firstly, the physico-chemical characteristics of the peat samples were classified and the oxidative pyrolysis and combustion by thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) were analyzed. Finally, analysis of the pyrolysis and the burning of the peat in conical calorimeter were carried out, with determination of emissions, burning rates and heat release rates. Samples of fibrous, fibrous / hazy peat and turfous soil were classified. The measured moisture values ranged from 58 to 90% on wet basis, depending on the type of peat and the location and timing of sample collection. The calculated average densities of the fibrous, fibrous / hemic and turfous peat samples were, respectively, 0.541, 0.585 and 0.527 g/cm³, whereas the solid phase densities were 1.753, 2.023 and 1.559 g/cm³. Fibrous peat, fibrous/hemic turf and turfous soil presented, respectively, higher calorific powers around 15171, 6643 and 16800 J/g, obtained in a conventional calorimeter, and 15663, 5428 and 13581 J/g obtained by DSC. The average values of activation energy of the oxidative pyrolysis and combustion processes were, respectively, 56461, 55594 and 48400 J/mol for the fibrous, fibrous/hemic peat and the peaty soil. During burning of peat samples in a conical calorimeter, the predominance of the incandescence process was observed and maximum emission values were determined: 235 ppm of CO, 1346 ppm of CO₂, 3.1 ppm of NO_x and 142 ppm of UHC in the case of fibrous peat, and 127 ppm of CO, 1135 ppm of CO₂, 5.4 ppm of NO_x and 72 ppm of UHC, in the case of turfous soil. The calculated maximum heat release rates were 1245 kW/m² and 1206 kW/m² for samples of peat fibrous and peat soil, respectively.

Keywords: Peat. Fires. Combustion.

FIGURAS

Figura 1.1 – Fumaça causada pelo incêndio de turfa na região central de São José dos Campos, SP.	2
Figura 1.2 – Turfa coletada em São José dos Campos, SP.	3
Figura 1.3 – Turfeira na região do Parque da Cidade no município de São José dos Campos, SP.	6
Figura 1.4 – Formação das turfeiras. Estágios evolutivos da turfeira em uma depressão em zona de planície de inundação.	7
Figura 1.5 – Distribuição global das turfeiras. Mapa esquemático das principais áreas de ocorrência de turfeiras e percentual de cobertura terrestre.	12
Figura 1.6 – Localização das turfeiras e imagem do município de São José dos Campos, SP.	14
Figura 1.7 – Localização da área estudada.	15
Figura 1.8 – Ilustração de um incêndio de em área de turfa ao longo da superfície e em profundidade.	16
Figura 1.9 – Incêndio subterrâneo iniciado na superfície que se propaga dentro do solo e emerge meses depois.	18
Figura 2.1 – Localização das coletas de amostras.	23
Figura 2.2 – Local da primeira coleta de amostras.	24
Figura 2.3 – Segunda coleta de amostras.	25
Figura 2.4 – Foto local da terceira coleta.	26
Figura 2.5 – Dessecador (a); amostra de turfa úmida (b); e amostra de turfa seca (c).	29
Figura 2.6 – Almofariz.	30
Figura 2.7 – Amostras de turfa: úmida (a), seca/semi-triturada (b) e peneirada (c).	30
Figura 2.8 – Proveta (a) e balança analítica (b) para medidas de massa específica aparente.	32
Figura 2.9 – Desenho esquemático de um picnômetro a gás.	33
Figura 2.10 – Picnômetro a gás, modelo Ultrapyc 1200e.	34
Figura 2.11 – Calorímetro IKA C200.	36
Figura 2.12 – Analisador de CHNS Perkin Elmer.	37

Figura 2.13 – Analisador térmico simultâneo, modelo SDT Q600, marca TA. 38	
Figura 2.14 – Moléculas de celulose (a), lignina (b) e ácido húmico (c) presentes na turfa.	40
Figura 2.15 – Calorímetro cônico.	44
Figura 2.16 – Suporte para prensagem das amostras.	45
Figura 2.17 – Amostra de turfa prensada.....	45
Figura 2.18 – Amostra para ensaio em calorímetro cônico.	46
Figura 2.19 – Calorímetro cônico.	47
Figura 2.20 – Amostra de turfa durante o ensaio realizado no calorímetro cônico.....	47
Figura 2.21 – Frascos lavadores, filtros e banho de gelo.....	48
Figura 3.1 – Perfil dos furos SJ-1336.....	52
Figura 3.2 – Perfil do furo SJ-1338.	53
Figura 3.3 – PCS versus resíduo das amostras de turfa.....	58
Figura 3.4 – Massa instantânea da amostra A1 (solo turfoso).....	62
Figura 3.5 – Massa normalizada da amostra A1 (solo turfoso).....	62
Figura 3.6 – Derivada percentual da massa da amostra A1 (solo turfoso), com base na massa inicial.	63
Figura 3.7 – Derivada percentual da massa da amostra A1 (solo turfoso), com base na massa instantânea.	64
Figura 3.8 – Troca térmica na amostra A1 (solo turfoso).....	65
Figura 3.9 – Massa instantânea da amostra B1 (solo turfoso).....	66
Figura 3.10 – Massa normalizada da amostra B1 (solo turfoso).....	67
Figura 3.11 – Derivada da massa da amostra B1 (solo turfoso) com base na massa inicial.....	67
Figura 3.12 – Derivada da massa da amostra B1 (solo turfoso) com base na massa instantânea.....	68
Figura 3.13 – Troca térmica na amostra B1 (solo turfoso).	69
Figura 3.14 – Massa instantânea da amostra B (turfa fibrosa).....	70
Figura 3.15 – Massa normalizada da amostra B (turfa fibrosa).....	70
Figura 3.16 – Derivada da massa da amostra B (turfa fibrosa) com base na massa inicial.....	71

Figura 3.17 – Derivada da massa da amostra B (turfa fibrosa) com base na massa instantânea.....	71
Figura 3.18 – Troca térmica na amostra B (turfa fibrosa).....	72
Figura 3.19 – Massa instantânea da amostra B2 (turfa fibrosa).....	73
Figura 3.20 – Massa normalizada da amostra B2 (turfa fibrosa).....	73
Figura 3.21 – Derivada da massa da amostra B2 (turfa fibrosa) com base na massa inicial.....	74
Figura 3.22 – Derivada da massa da amostra B2 (turfa fibrosa) com base na massa instantânea.	75
Figura 3.23 – Troca térmica na amostra B2 (turfa fibrosa).....	75
Figura 3.24 – Massa instantânea da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).	77
Figura 3.25 – Massa normalizada da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).	77
Figura 3.26 – Derivada da massa da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) com base na massa inicial.	78
Figura 3.27 – Derivada da massa da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) com base na massa instantânea.....	78
Figura 3.28 – Troca térmica na amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).	79
Tabela 3.10 – Comparação dos valores de PCS e MNQ obtidos no calorímetro e no analisador térmico simultâneo.....	81
Figura 3.29 – Logaritmo da razão de aquecimento (β) versus o inverso da temperatura para a amostra A1 (solo turfoso).....	83
Figura 3.30 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação à temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa A1 (solo turfoso).....	84
Figura 3.31 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B (turfa fibrosa).	86
Figura 3.32 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B (turfa fibrosa).	86
Figura 3.33 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B1 (solo turfoso).....	87
Figura 3.34 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B1 (solo turfoso).....	87

Figura 3.35 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B2 (turfa fibrosa).....	88
Figura 3.36 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B2 (turfa fibrosa).	88
Figura 3.37 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).....	89
Figura 3.38 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B5 (turfa fibrosa/hêmica).	89
Figura 3.39 – Fator pré-exponencial (A) versus a conversão (α).....	91
Figura 3.40 – Massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante análise em calorímetro cônico utilizando 40 e 50% da potência da resistência elétrica, de 5000W.....	92
Figura 3.41 – Normalização da massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante análise em calorímetro cônico, utilizando 40 e 50% da potência da resistência elétrica.....	93
Figura 3.42 – Fração molar de O_2 na exaustão dos produtos durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.	94
Figura 3.43 – Emissões de CO_2 durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.....	95
Figura 3.44 – Emissões de CO durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.....	95
Figura 3.45 – Emissões de NO_x durante a queima de amostras de turfa no calorímetro cônico.....	96
Figura 3.46 – Emissões de UHC durante a queima de amostras de turfa no calorímetro cônico.....	97
Figura 3.47 – Temperatura na exaustão medida pelo analisador de gases durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.	98
Figura 3.48 – Temperatura próxima à superfície das amostras de turfa.....	99
Figura 3.49 – Fração molar de O_2 , CO_2 , CO, NO_x e UHC, e temperaturas na exaustão/superfície amostra para a amostra A1 (solo turfoso).....	100
Figura 3.50 – Fração molar de O_2 , CO_2 , CO, NO_x e UHC, e temperaturas na exaustão/superfície amostra para a amostra B2 (turfa fibrosa).....	101

Figura 3.51 - Comparação das concentrações de CO ₂ , CO e UHC e da temperatura na exaustão para as amostras de turfa A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).....	102
Figura 3.52 – Taxa de liberação de calor para as amostras de turfa A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).....	103
Figura A.1 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 5 °C/min.....	115
Figura A.2 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 10 °C/min.....	116
Figura A.3 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 15 °C/min.....	116
Figura A.4 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 20 °C/min.....	117
Figura A.5 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 30 °C/min.....	117
Figura A.6 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min.....	118
Figura A.7 – DSC-TGA para a amostra B1(solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.....	119
Figura A.8 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.....	119
Figura A.9 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.....	120
Figura A.10 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.....	120
Figura A.11 – TGA-DSC para a amostra B a uma taxa de aquecimento de 5°C/min (turfa fibrosa).	121
Figura A.12 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.....	122
Figura A.13 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.....	122
Figura A.14 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.....	123

Figura A.15 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 5°C/min.	123
Figura A.16 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.	124
Figura A.17 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.	124
Figura A.18 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.	125
Figura A.19 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.	125
Figura A.20 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 5°C/min.	126
Figura A.21 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.	127
Figura A.22– TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.	127
Figura A.23 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.	128
Figura A.24 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Metodologia de caracterização de turfas de Van Post.....	8
Tabela 1.2– Turfeiras do município de São José dos Campos, SP e suas áreas.....	13
Tabela 3.1 – Classificação das amostras de turfa.....	51
Tabela 3.2 – Teores de umidade segundo normas ASTM D2974-87 método A e ABNT NBR16097.....	53
Tabela 3.3 – Teores de umidade em base seca e base úmida, com secagem a 80 °C por 24 h, com procedimento de secagem INPE/TURFA.....	55
Tabela 3.4 – Determinação da massa específica aparente das amostras de turfa.....	56
Tabela 3.5 – Massa específica da fase sólida das amostras de turfa.....	57
Tabela 3.6 – Valores de PCS para as amostras de turfa.....	58
Tabela 3.7 – Amostras para análise CHNS das amostras de turfa.....	60
Tabela 3.8 – Percentagem de C, H, N e S para as amostras de turfa.....	60
Tabela 3.9 – Amostras para análise termogravimétrica.....	61
Tabela 3.11 – Energia de ativação para as amostras de turfa.....	90
Tabela 3.12 – Fator pré-exponencial para as amostras de turfa.....	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Amostra de solo turfoso
ATS	Analisador térmico simultâneo
A1	Amostra de solo turfoso
A2	Amostra de turfa fibrosa
A3	Amostra de turfa fibrosa
B	Amostra de turfa fibrosa
B1	Amostra de solo turfoso
B2	Amostra de turfa fibrosa
B3	Amostra de turfa fibrosa
B5	Amostra de turfa fibrosa/hêmica
C	Átomo de carbono
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono, gás carbônico
C2	Amostra de turfa fibrosa/hêmica
C3	Amostra de turfa fibrosa/hêmica
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
D2	Amostra de turfa fibrosa
D4	Amostra de turfa fibrosa/hêmica
H1...H10	Grau de umidificação

MNQ	Material não queimado
NO _x	Grupo dos óxidos de nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₂	Gás oxigênio
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
SJ-2	Turfeira localizada em São José dos Campos, SP
T.A.	Taxa de aquecimento
TGA	Termogravimetria ou Análise Termogravimétrica
UHC	Hidrocarboneto não queimado

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator de frequência ou fator pré-exponencial
C	Calor específico do sistema, J
C	Constante de calibração do calorímetro, kJ/s
d_{ap}	Massa específica aparente, g/cm ³
$(dm/dT)/m$	Derivada normalizada instantânea, 1/°C
$(dm/dT)/m_o$	Derivada da massa instantânea, 1/°C
E	Energia liberada por kg de O ₂ consumido, kW/kg de O ₂
E_a	Energia de ativação, J/mol
h	Umidade em base úmida, %
H	Teor de hidrogênio no combustível, kg de hidrogênio/kg de combustível seco
m	Inclinação da reta
m	Massa da amostra, g
m_o	Massa inicial da amostra, g
m_f	Massa final da amostra, g
m_s	Massa seca da amostra, g
m_u	Massa úmida da amostra, g
n_{CO}	Número de mols de CO na saída do analisador de gases
$n_{CO,e}$	Número de mols de CO na entrada do analisador de gases

n_{CO_2}	Número de mols de CO ₂ na saída do analisador de gases
$n_{CO_2,e}$	Número de mols de CO ₂ na entrada do analisador de gases
n_{N_2}	Número de mols de N ₂
n_{O_2}	Número de mols de O ₂ na saída do analisador de gases
$n_{O_2,e}$	Número de mols de O ₂ na entrada do analisador de gases
P_1	Pressão no porta amostra, Pa
P_2	Pressão na câmara vazia, Pa
$\frac{g}{q}$	Taxa de liberação de calor, W/m ²
$Q_{ext,1}$	Correção para a energia térmica gerada pelo fio de algodão, J
$Q_{ext,2}$	Correção para a energia térmica gerada por outros compostos, J
R	Constante dos gases, J/kmol
t	Tempo, s
T	Temperatura, k
T_o	Temperatura inicial, K
V	Volume da amostra, cm ³
V_m	Volume da câmara da amostra, cm ³
V_s	Volume da amostra, cm ³
V_z	Volume na câmara de expansão, cm ³
w	Umidade em base seca, %

W	Teor de umidade do combustível, kg de água/kg de combustível seco
X_{CO}	Fração molar de CO na saída do analisador de gases
X_{O_2}	Fração molar do O ₂ na saída do analisador de gases
$X_{O_2,e}$	Fração molar do O ₂ na entrada do analisador de gases
ΔT	Aumento da temperatura da água no interior da célula de medição, K
ΔP	Varição da pressão durante a exaustão de gases, Pa
β	Taxa de aquecimento
\emptyset	Depleção de O ₂
α	Conversão da amostra, %

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	A turfa.....	2
1.1.1	Formação das turfeiras.....	5
1.1.2	Classificação da turfa.....	7
1.1.3	Aplicações da turfa.....	10
1.1.4	A turfa no mundo e no brasil.....	11
1.2	Incêndio.....	15
1.2.1	Combustão da turfa.....	15
1.2.2	Incêndio em turfeiras.....	17
1.3	História.....	19
1.4	Objetivo do trabalho.....	20
2	METODOLOGIA.....	23
2.1	Coletas de amostras.....	23
2.1.1	Primeira coleta.....	24
2.1.2	Segunda coleta.....	24
2.1.3	Terceira coleta.....	26
2.2	Classificação da turfa.....	26
2.3	Medidas das características físico-químicas das amostras de turfa.....	27
2.3.1	Teor de umidade.....	27
2.3.2	Moagem das amostras de turfa.....	29
2.3.3	Massa específica.....	31
2.3.4	Poder calorífico.....	34
2.4	Análise elementar da turfa.....	36
	A análise elementar das amostras de turfa refere-se à quantidade de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) presente na turfa. O equipamento utilizado foi o Analisador de CHNS/O 2400 Series II, Perkin Elmer, mostrado na Figura 2.12.....	36
2.5	Decomposição térmica da turfa.....	37
2.5.1	Decomposição da turfa.....	39
2.5.2	Parâmetros Cinéticos.....	39
2.6	Queima em calorímetro cônico.....	44
2.6.1	Determinação da taxa de liberação de calor.....	49

3	ANÁLISE EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
	Este capítulo mostra os resultados obtidos com as amostras de turfa coletadas. São apresentados os dados de classificação das amostras, de caracterização físico-química, análise termogravimétrica e queima em calorímetro cônico.....	51
3.1	Classificação da turfa	51
	A Tabela 3.1 mostra a classificação das amostras de turfa, incluindo as respectivas profundidades de cada amostra de turfa, coletadas no município de São José dos Campos.....	51
3.2	Características físico-químicas das amostras de turfa	53
3.2.1	Teor de umidade.....	53
3.2.2	Massa específica	55
3.2.3	Poder calorífico da turfa	57
3.3	Análise elementar da turfa.....	59
3.4	Análise termogravimétrica	60
3.4.1	Obtenção dos parâmetros cinéticos.....	82
3.4.2	Determinação da energia de ativação	82
3.4.2	Determinação do fator pré-exponencial.....	90
3.5	Queima em calorímetro cônico	91
3.5.1	Determinação da taxa de liberação de calor	102
4.	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
	APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	115

1 INTRODUÇÃO

Incêndios em depósitos de turfa são observados em várias regiões do mundo, tratando-se, no seu conjunto, do maior fenômeno de combustão sobre a Terra. Estes incêndios ocasionam prejuízos econômicos, danos aos ciclos biogeoquímicos locais e globais, com emissões de poluentes e danos à saúde da população. Estes fatores, somados à necessidade do controle dos incêndios, bem como a análise do uso potencial da turfa em diferentes aplicações, motivam a realização de estudos sobre a combustão da turfa.

As turfeiras cobrem uma área estimada em 400 milhões de hectares, o equivalente a 3 % da superfície terrestre do planeta. A maior parte (350 milhões de hectares) encontra-se no hemisfério norte, principalmente na América do Norte, Rússia e Europa.

A turfa é um material orgânico e inflamável, considerada o primeiro estágio do carvão mineral, formada pela decomposição de vegetais ricos em celulose. É encontrada em solos encharcados e pantanosos. Quando esse solo é drenado, seja naturalmente por uma estiagem ou realizado pelo homem, pode ocorrer o perigo de incêndio nessas regiões turfosas.

Os incêndios em áreas ricas em turfa são mais difíceis de serem extintos, pois ocorrem de forma subterrânea, podendo atingir as camadas de turfa mais profundas, além das camadas superficiais onde geralmente ocorre a ignição. A única maneira comprovada de acabar com um incêndio de turfa é encharcando totalmente o solo, o que pode ser muito difícil, dependendo da profundidade da camada de turfa, que pode atingir mais de 20 metros de profundidade (PAGE et al., 2004).

Um incêndio de turfa pode ocasionar riscos a instalações, construções, plantações e pecuária, causar queimadas e afetar a flora e a fauna silvestre. Pode também prejudicar a saúde da população, devido à geração de intensa fumaça e atrapalhar a visibilidade da região afetada.

No Brasil, ocorrem frequentemente incêndios em áreas turfosas do nordeste, centro-oeste e sudeste.

Neste trabalho, são estudadas amostras de turfas encontradas no município de São José dos Campos, SP. Nessa região, a área de turfa se estende ao longo do vale do rio Paraíba do Sul. A cidade de São José dos Campos, SP, tem sido, de forma recorrente, afetada por esse tipo de incêndio.

A Figura 1.1 mostra a imagem da fumaça causada pelo incêndio de turfa comumente observado nas vizinhanças da região central do município de São José dos Campos. Ocasionalmente é observada a formação de fumaça no centro urbano propriamente, inclusive com liberação de fumaça através do asfalto.

Figura 1.1 – Fumaça causada pelo incêndio de turfa na região central de São José dos Campos, SP.



Fonte: Rádio Piratininga (2016).

1.1 A turfa

Os combustíveis fósseis, em geral, têm sua origem há milhões de anos, quando fenômenos naturais acumularam quantidades consideráveis de matéria orgânica na superfície do solo. Esses depósitos orgânicos foram encobertos por novas camadas de solo ao longo do tempo,

proporcionando transformações químicas importantes para a formação desses combustíveis. Produtos desta cadeia de transformações incluem a turfa, o linhito, o carvão mineral e o antracito.

A turfa é considerada o primeiro estágio do carvão mineral, formada nos últimos dez mil anos, a partir do atrofiamento e da decomposição incompleta de material lenhoso e de arbustos, musgos e líquens em condições de umidade excessiva. Assim, a turfa está associada às zonas pantanosas, brejos, charcos e banhados, constituindo uma suspensão quase coloidal de 80 a 90 % de água (AGUIAR, 1987). A inundação obstrui os fluxos de oxigênio da atmosfera o que diminui as taxas de decomposição (KEDDY, 2010). Solos que contêm, principalmente, turfa são conhecidos como histossolos ou organossolos. A Figura 1.2 mostra uma imagem de turfa coletada em São José dos Campos, SP.

Figura 1.2 – Turfa coletada em São José dos Campos, SP.



Fonte: Fotografia de Laura Borma (2017).

Hugron et al. (2013) mencionam que o ecossistema das turfeiras é o absorvedor de carbono mais eficiente do planeta porque as plantas que crescem nas turfeiras captam o CO₂ que é naturalmente liberado da turfa, mantendo-se um equilíbrio. Em turfeiras naturais, a "taxa anual de produção de biomassa é maior do que a taxa de decomposição", mas, segundo esses autores, leva "milhares de anos para as turfeiras

desenvolverem depósitos de 1,5 a 2,3 m, que é a profundidade média das turfeiras boreais".

Para Abreu (1973), as turfas mais comuns derivam de musgos e de plantas das famílias esfagnáceas e ciperáceas que se associam a várias algas. Possuem um alto teor de umidade, com 80 a 90 % de água e poder calorífico entre 10500 e 17000 J/g. Geralmente são ácidas, apresentam entre 1 e 3 % de nitrogênio e entre 1,5 a 3 % de cinzas. As turfeiras formadas no estado de São Paulo se encontram às margens do rio Paraíba do Sul e estão sujeitas às suas inundações em bacias secundárias mais elevadas a, aproximadamente, 6 km do rio.

De acordo com a Sociedade Internacional de Turfa (INTERNATIONAL PEAT SOCIETY – IPS, 2016), a turfa é uma substância fóssil, orgânica e mineral, originada da decomposição de vegetais. É formada pela decomposição da matéria orgânica em condições específicas, como o ambiente anóxico, isto é, de baixa concentração de oxigênio, com limitação de elementos minerais, baixo pH e baixa temperatura. Essas condições, em ambiente saturado em água, promove a decomposição da matéria orgânica. Suas propriedades dependem do material de origem e do grau de decomposição. Sua coloração pode variar do marrom ao preto. Do ponto de vista físico-químico, é um material poroso, altamente polar, com elevada capacidade de adsorção para metais de transição e moléculas orgânicas polares.

Os principais constituintes da turfa são a lignina, a celulose e os ácidos húmicos. Normalmente a lignina e celulose estão em maiores quantidades, pois o teor de substâncias húmicas é função direta do grau de decomposição, uma vez que elas não existem naturalmente nas plantas vivas, mas são produtos intermediários da decomposição da matéria orgânica (FUCHSMAN, 1980).

A velocidade de decomposição para a formação das turfas depende do tipo de vegetação e clima. O clima tropical, como o do Brasil, possui uma grande disponibilidade de massa vegetal, o que promove uma

decomposição acelerada, diminuindo a quantidade de material a ser fossilizado como turfa. Gerações consecutivas de vegetais se transformam em turfas, provocando o empilhamento em camadas (GARCIA, 1994). No perfil de uma turfeira, os estratos inferiores apresentam camadas mais escuras, bastante decompostas, o que sugere um período de prolongada precipitação. Esses estratos, formados por plantas que vivem abaixo do nível da água, são mais coloidais e não possuem materiais fibrosos (LIMA et al., 1982).

1.1.1 Formação das turfeiras

A formação de uma turfeira depende de um sistema geomorfológico. O meio aquoso com baixa oxigenação é essencial para a preservação e evolução da matéria orgânica depositada. O material imerso sofre a atuação de bactérias, fungos e de outros microorganismos aeróbios que são capazes de destruir a matéria orgânica dos vegetais mortos. Esse processo de oxidação e biodegradação caracteriza a evolução energética fóssil da matéria orgânica vegetal, ocorrendo assim o desaparecimento da estrutura original dos vegetais, a perda de oxigênio e hidrogênio e o enriquecimento do carbono (TOLEDO, 1999).

Podemos encontrar vários tipos de turfa, dependendo do seu material de origem, da variedade dos vegetais presentes e do grau de decomposição do material.

Em uma turfeira, encontramos camadas bem decompostas e de coloração escura, que indica um período de seca ou período com pouca água. A ocorrência de camadas mais claras, ricas em fibras de plantas pouco decompostas, indica um período de precipitação prolongada. No perfil de uma turfeira, o estrato inferior é formado por plantas que se encontram abaixo do nível da água, sendo assim muito mais coloidal e livre de materiais fibrosos do que os estratos que estão acima do nível da água (WAKSMAN, 1942; LEINZ, 1975).

A Figura 1.3 mostra uma turfeira localizada no Parque da Cidade, no município de São José dos Campos, SP.

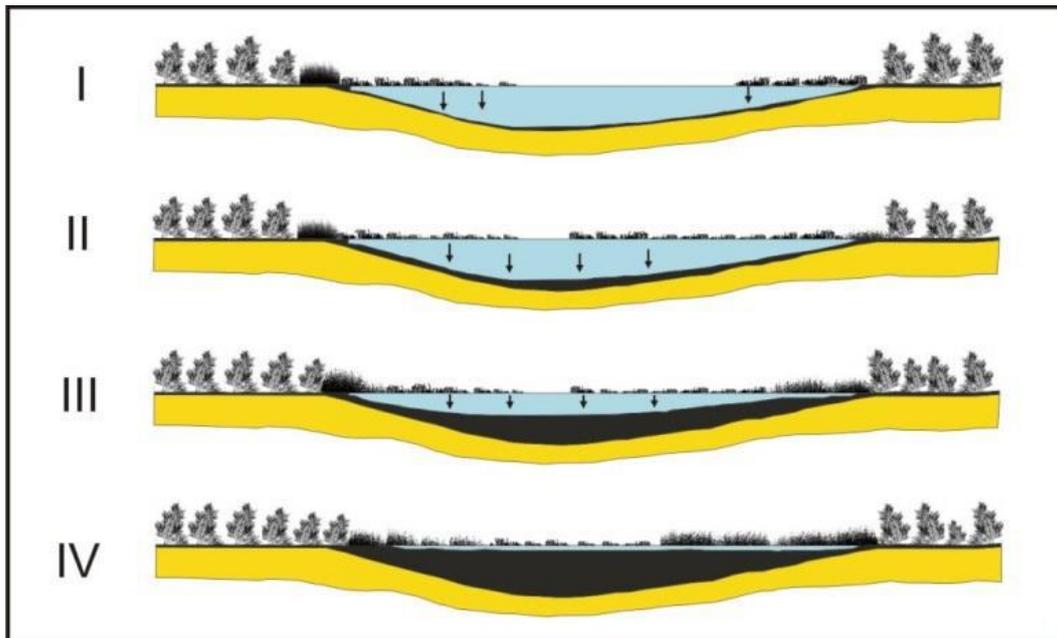
Figura 1.3 – Turfeira na região do Parque da Cidade no município de São José dos Campos, SP.



Fonte: Produção da autora (2016).

A Figura 1.4 mostra o desenvolvimento de uma turfeira. Esse processo se inicia pela deposição de detritos vegetais que preenchem lentamente uma depressão qualquer, como por exemplo, um lago (I). Algas e plantas aquáticas são os primeiros vegetais a se acumularem, formando as primeiras camadas de turfa. Esta depressão, onde se encontram os detritos vegetais, vai se tornando cada vez mais rasa, permitindo assim a invasão da vegetação marginal, constituída pelas gramíneas, juncos, arbustos e árvores (II e III). A partir desse ponto, inicia-se a formação de um pântano. Os restos de vegetais, cobertos pela água, transformam-se gradativamente em turfa. Caso o nível da água se eleve repentinamente, o crescimento de árvores pode ser interrompido, reaparecendo plantas inferiores, pois são mais adaptadas ao ambiente aquático, iniciando assim um novo período de acumulação de turfa (IV) (WAKSMAN, 1942; LEINZ, 1975).

Figura 1.4 – Formação das turfeiras. Estágios evolutivos da turfeira em uma depressão em zona de planície de inundação.



Fonte: Leinz (1975).

1.1.2 Classificação da turfa

Foram criadas algumas classificações para a turfa, baseadas em algumas características, como a vegetação da superfície, as propriedades químicas, a origem botânica, o processo genético, o grau de decomposição, entre outras. As classificações mais utilizadas são segundo o seu grau de decomposição.

Uma classificação importante e muito utilizada foi proposta por Van Post em 1924. Neste método, a turfa é classificada em uma escala visual de 10 pontos (H1 para a menos decomposta, sendo H10 para a mais decomposta), após um teste de campo que consiste em espremer na mão uma amostra fresca e molhada e observar o aspecto do material que flui entre os dedos e daquele que fica retido (CLYMO, 1983). Apesar de suas limitações, é uma classificação muito utilizada, sendo nesta considerados o estágio fibroso, o hêmico e o sáprico. Esses estágios são definidos pela análise do conteúdo e tamanho das fibras.

Fibras são definidas como fragmentos de planta, excluindo raízes vivas, com dimensão suficiente para ficar retida na peneira de 100 mesh (abertura de 0,15 mm de diâmetro). Estes materiais devem manter estruturas celulares reconhecíveis da planta original (FAO, 2007).

A Tabela 1.1 mostra a caracterização dos diferentes tipos de turfa, como o seu grau de decomposição, a cor da água e a fração de turfa que flui entre os dedos ao pressioná-la, além da descrição do aspecto físico da turfa que sobra após essa pressão realizada na mão.

Tabela 1.1 - Metodologia de caracterização de turfas de Van Post.

Grau de umidificação	Características	Cor da água que flui entre os dedos	Fração da turfa que flui entre os dedos	Resta na mão	
				Forma	Estrutura vegetal
H1	Sem decomposição	Incolor	Não passam sólidos entre os dedos	Não tem aspecto gelatinoso	Estrutura vegetal nitidamente reconhecível
H2	Muito pouco decomposta	Ligeiramente castanha			
H3	Fracamente decomposta	Castanha fracamente			
H4	Decomposta fracamente	Muito castanha			
H5	Decomposta	Líquido bem escuro	Poucos sólidos fluem	Apresenta aspecto gelatinoso	Ainda poucos restos vegetais reconhecíveis
H6	Bem decomposta		Passa 1/3 do volume		
H7	Fortemente decomposta		Passa metade do volume		
H8	Muito fortemente decomposta		Passa 3/5 do volume	Ficam na mão resíduos de fibras, raízes, etc	
H9	Quase integralmente decomposta		Passa quase tudo		
H10	Completamente decomposta		Flui integralmente entre os dedos	Sobra muito pouco ou quase nada nas mãos	

Fonte: Produção da autora.

A turfa fibrosa é pouco decomposta, geralmente possui a cor marrom avermelhada. É encontrada em ambiente ácido, formando as camadas mais superficiais das turfeiras. A turfa hêmica apresenta grau de

decomposição intermediário, com sua tonalidade variando do marrom ao preto. Normalmente é formada por gramas, arbustos, plantas rasteiras e aquáticas. Já a turfa sáprica é bastante escura e possui elevado grau de decomposição.

Segundo a metodologia de Van Post, as turfas entre H1 e H3 são denominadas fibrosas, de H4 a H6 denominadas hêmicas e de H7 a H10 denominadas como sápricas. Quanto aos percentuais de fibras presentes na turfa, os teores se apresentam acima de 70 % nas fibrosas, entre 10 e 40 % nas hêmicas e abaixo de 10 % nas sápricas (LEMASTERS et al, 1983). As turfas mais decompostas tendem a ter o teor de carbono, a densidade e o poder calorífico, maiores em relação às turfas menos decompostas (KEYS, 1983).

A Sociedade Internacional de Turfa (INTERNATIONAL PEAT SOCIETY – IPS, 2016) classifica a turfa em três categorias:

- ✓ Turfa fibrosa: é pouco decomposta (H1 a H3), geralmente marrom avermelhada, com a porção orgânica com mais de 2/3 de fibras vegetais reconhecíveis e o restante decomposto. É encontrada em ambiente ácido, formando as camadas mais superficiais das turfeiras, sendo utilizada principalmente para horticultura e agricultura.
- ✓ Turfa hêmica: possui decomposição intermediária (H4 a H7), com tonalidade entre o marrom e o preto, possuindo de 1/3 e 2/3 de fibras reconhecíveis. Ela é formada por gramas, arbustos, plantas rasteiras silvestres e plantas aquáticas. Pode ser utilizada para fins energéticos e/ou na agricultura.
- ✓ Turfa sáprica: é muito escura e apresenta elevado grau de decomposição (H8 a H10). Contém 1/3 de fibras reconhecidas e pode apresentar forma gelatinosa. Pode ser formada pela decomposição acentuada dos dois tipos de turfa anteriormente citados ou pela sedimentação de material orgânico morto de plantas aquáticas e algas, no fundo de lagos raso. Pode ser

utilizada para fins energéticos ou ainda na recuperação de áreas degradadas.

1.1.3 Aplicações da turfa

A turfa pode ser utilizada para gerar energia elétrica e térmica, industrial e doméstica. Os principais inconvenientes para este fim são os altos custos para a retirada da água da turfa, os custos com transportes e, no processo de combustão direta, as cinzas podem vitrificar e sintetizar nas grelhas, além do perigo de explosão da poeira durante a moagem e transporte aos silos.

O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1979) realizou pesquisas com a turfa brasileira do estado de São Paulo, sobre aspectos geológicos e de lavra. Em seus testes de aproveitamento do material em gaseificadores e queimadores, concluiu que a obtenção de gás combustível é viável, comparando com o carvão mineral.

A partir de turfas com baixo teor de cinza (cerca de 3%, base seca), pode ser produzido o coque de turfa. O coque de turfa é o sólido resultante da pirólise da turfa. Esse material possui boa resistência e baixo poder abrasivo. É poroso, possui baixo peso específico e uma alta porcentagem de carbono fixo. O coque de turfa queima produzindo uma grande quantidade de calor, sem geração de fumaça e odor. Além de sua principal utilização como combustível doméstico, este material pode ser utilizado para a produção do carvão ativado, limpeza de esgotos e catálise (SILVA et al., 1982).

Constitui-se também de matéria prima potencial para a obtenção de produtos químicos, como ceras, esteroides, ácidos húmicos e carboidratos. A turfa pode ser utilizada também para obtenção de alcatrões, açúcares, proteínas, compostos medicinais, entre outros, dependendo do grau de decomposição do material (NUCCI, 1985).

A turfa tem sido estudada como um material alternativo para a remoção de impurezas de efluentes como, por exemplo, óleo, metais, odores,

pesticidas e corantes. Essa aplicação é devida à existência de grupos funcionais, como carboxílicos e fenólicos, de grande reatividade que atuam nas reações de troca iônica, fazendo com que o potencial de adsorção das turfas para sólidos específicos, como metais e moléculas orgânicas polares, seja muito alto (BROWN et al., 2000).

Pode ser usada também na produção de derivados orgânicos e condicionante de solo, além de ser utilizada como adsorvente de óleo derramado no mar e filtro de esgoto (MONTICELI et al., 1990).

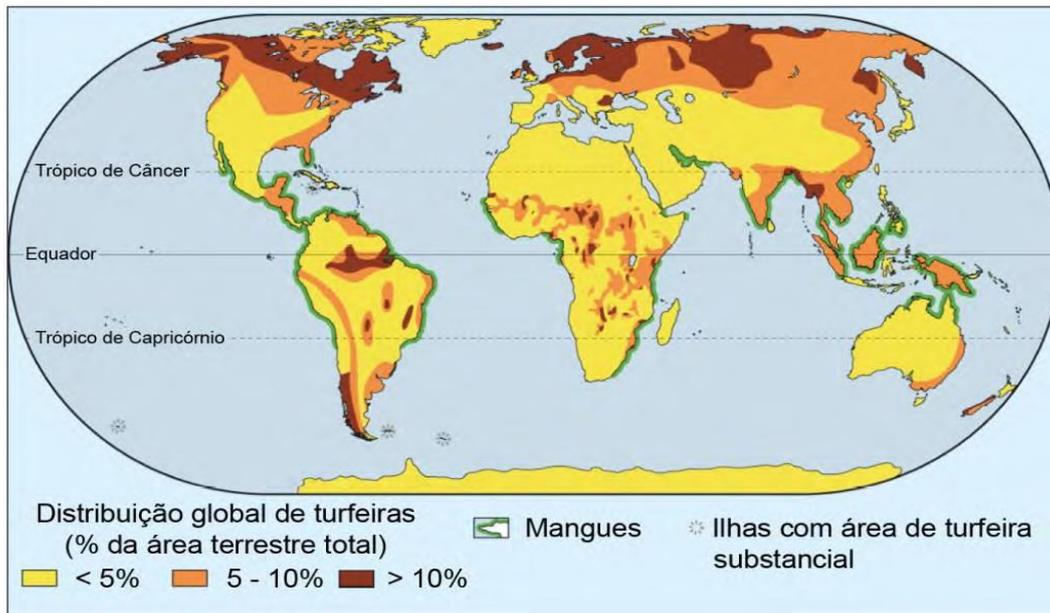
A turfa utilizada na agricultura é considerada um produto nobre. É utilizada como substrato para culturas hortifrutigranjeiras e de jardinagens (NUCCI, 1985).

1.1.4 A turfa no mundo e no brasil

De acordo com a International Peat Society – IPS, 2016, mais de 90 % das turfeiras encontram-se nos cinturões frios e temperados do Hemisfério Norte, e o restante em latitudes tropicais e subtropicais, principalmente em florestas densas e áreas pantanosas. Estima-se que cerca de 4 % da superfície terrestre (aproximadamente 422 milhões de hectares) seja coberta por turfeiras. Alguns países onde encontramos grandes depósitos de turfa são a Finlândia, onde 30 % da área total do país se encontram cobertos por turfas, assim como 17 % da Irlanda, 15 % do Canadá e 10 % da Escócia (SHOTYK, 1998). A Rússia detém cerca de 60 % das reservas mundiais conhecidas deste material (CLYMO, 1983).

A Figura 1.5 mostra a distribuição global das turfeiras, suas principais áreas de ocorrência e percentual da cobertura terrestre.

Figura 1.5 – Distribuição global das turfeiras. Mapa esquemático das principais áreas de ocorrência de turfeiras e percentual de cobertura terrestre.



Fonte: Jackson e Charman (2010).

No Brasil, encontra-se a turfa em todo o território nacional. O Projeto Turfa, realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), em 1980, localizou importantes reservas de turfa na faixa litorânea do país. No litoral do Sudeste, foram encontradas turfeiras nas extensas planícies costeiras dos estados de São Paulo, Espírito Santo e Rio de Janeiro. No Nordeste, as reservas estão no litoral dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Nas regiões que são consideradas interiores, foram localizados importantes depósitos de turfa no Vale do Paraíba (de São Paulo a Rio de Janeiro), no estado de Minas Gerais, no sudeste baiano e nas vizinhanças do Distrito Federal.

Os depósitos de turfa no Brasil são classificados como turfeiras baixas, originados em dois ambientes: em várzeas dos cursos baixos de rios, sobre antigos manguezais, com alguma influência marinha em camadas inferiores e em baixadas paralelas à costa, separadas entre diversas gerações de dunas fósseis de areia (LENZ, 1984). As turfeiras brasileiras possuem, em sua maioria, um teor mineral elevado e 1,5 % de enxofre,

considerado como médio. Possuem variadas espécies vegetais em sua composição, desde musgos, gramíneas e filicíneas, até árvores de mata úmida. A maior parte constitui turfa altamente decomposta.

No Vale do Paraíba, em São Paulo, são conhecidas turfeiras situadas nas planícies de inundação do rio Paraíba do Sul e de alguns de seus afluentes, que seguem até o Oceano Atlântico (ALMEIDA, 1976). Estas turfeiras apresentam de 20 a 2000 hectares e suas espessuras podem variar até cerca de 10 metros de profundidade (CPRM, 1980). Em geral, são turfas com classificação de fibrosas a hêmicas, com teor de cinzas superior a 20 %. Nas áreas mais distantes do rio, com inundações menos frequentes, o conteúdo de cinzas é mais baixo (OLIVEIRA, 2002).

Neste trabalho, são caracterizadas amostras de uma turfeira da cidade São José dos Campos, localizada no Vale do Paraíba, SP.

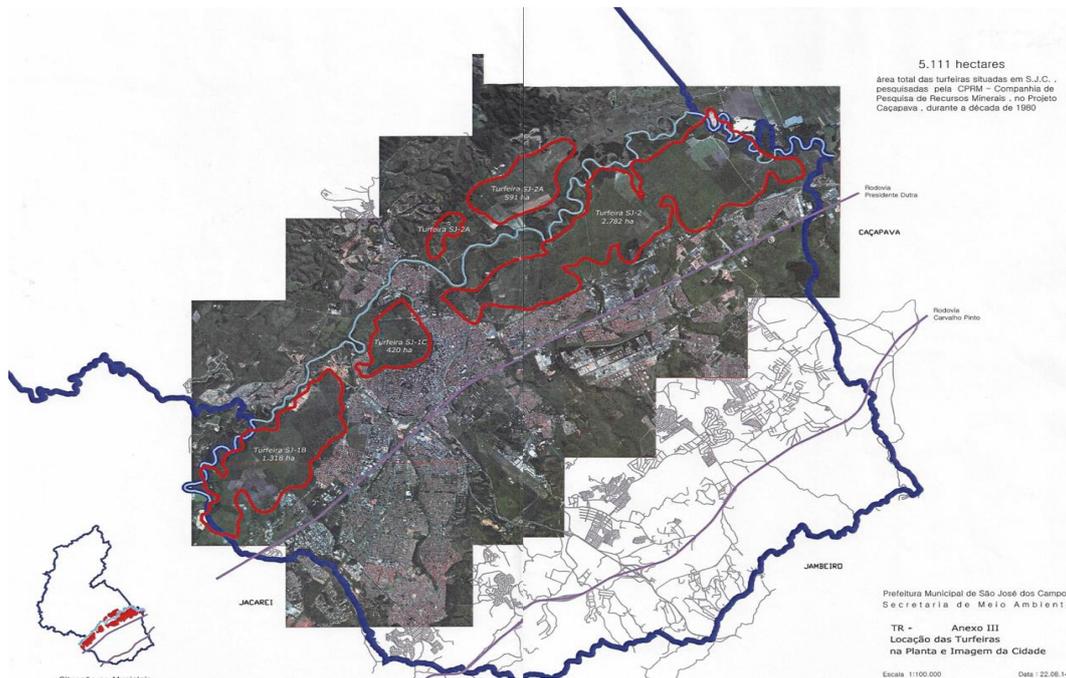
Em São José dos Campos, a turfa está distribuída em cinco áreas principais, totalizando aproximadamente 5111 ha, conforme mostra a Figura 1.6, enquanto a Tabela 1.2 apresenta as dimensões e respectivas identificações das turfeiras de São José dos Campos.

Tabela 1.2– Turfeiras do município de São José dos Campos, SP e suas áreas.

Identificação	Área (ha)
SJ-1B	1318
SJ-1C	420
SJ-2	2782
SJ-2A	591
Total	5111

Fonte: CPRM (1981)

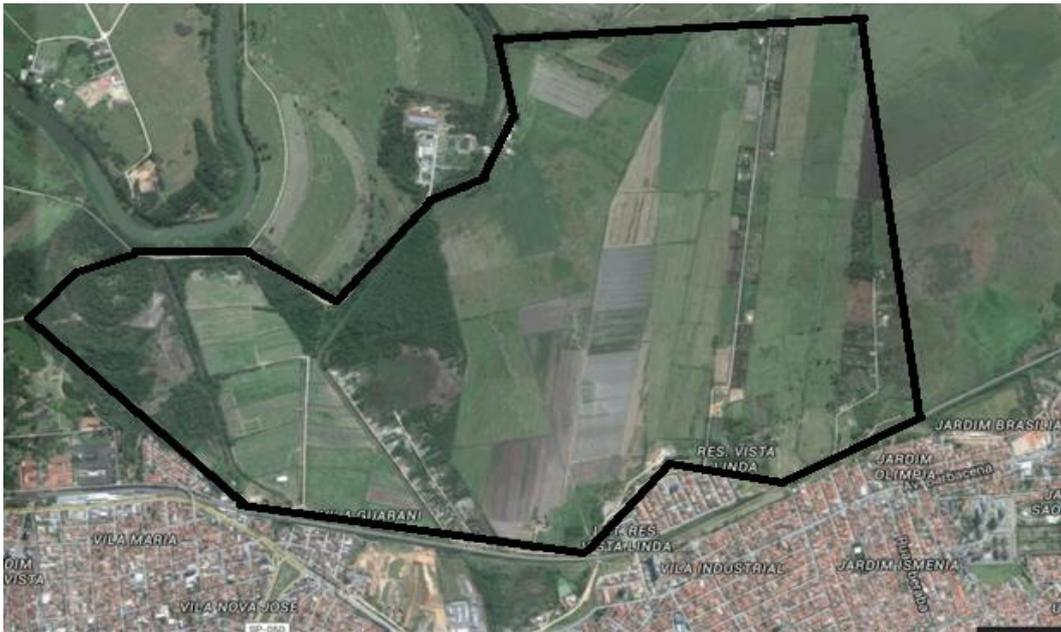
Figura 1.6 – Localização das turfeiras e imagem do município de São José dos Campos, SP.



Fonte: CPRM (1981).

Foi escolhida a área SJ-2 para a análise da turfa neste trabalho, por ser uma área de turfa próxima a residências, como mostra a Figura 1.7, o que pode oferecer riscos de segurança e saúde à população local. A turfeira SJ-2, situada em São José dos Campos, estende-se por cerca de 12 km exclusivamente à margem direita do rio Paraíba do Sul, apresentando largura média de 2 km. Apresenta-se capeada em quase toda sua extensão por solos de coloração escura, ricos em matéria orgânica (IPT 1979).

Figura 1.7 – Localização da área estudada.



Fonte: Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015).

1.2 Incêndio

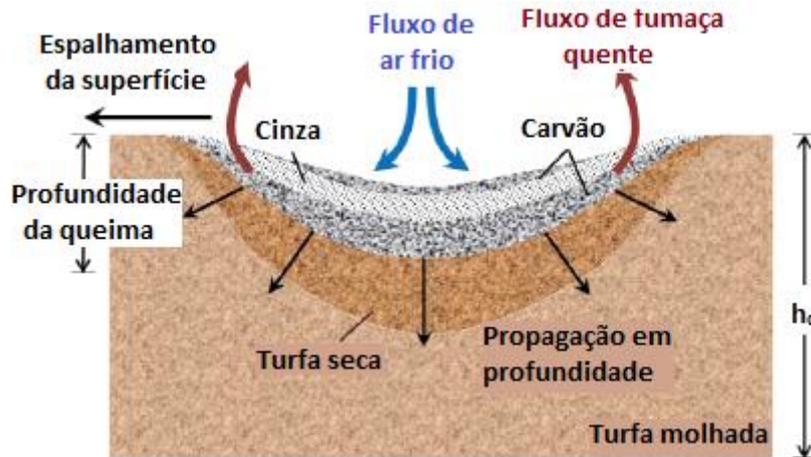
Incêndio é o fogo de grandes proporções que destrói aquilo que não estava destinado a ser queimado. Um incêndio implica na ocorrência de fogo fora de controle, com riscos para os seres vivos e/ou qualquer estrutura. Pode ser provocado pelo homem (propositalmente ou por negligência) ou ter como origem causas naturais (por exemplo, descargas elétricas) (STRUMINSKI, 2016).

1.2.1 Combustão da turfa

A queima da turfa ocorre por incandescência (smoldering), um processo de combustão sem chama que ocorre em combustíveis carbonizáveis, tais como madeira, carvão, cigarros e polímeros. A reação de combustão é heterogênea e acontece no interior e na superfície do combustível poroso (COSTA e SANDBERG, 2004).

A Figura 1.8 mostra uma ilustração de um incêndio em área de turfa ao longo da superfície e em profundidade, que ocorre por incandescência.

Figura 1.8 – Ilustração de um incêndio de em área de turfa ao longo da superfície e em profundidade.



Fonte: Adaptado de Huang e Rein (2014).

As principais reações heterogêneas durante a incandescência são:



Os incêndios superficiais por *smoldering* da turfa podem elevar a temperatura do solo acima de 300 °C por várias horas com picos de temperatura próximos de 600 °C (FRANDSEN, 1991). Tais temperaturas podem resultar na decomposição do material orgânico e matar importantes organismos no solo.

Frandsen monitorou o calor liberado por unidade de massa de oxigênio consumido durante o processo de *smoldering*, usando um aparato laboratorial. Utilizou a hipótese de que a maioria dos produtos florestais apresenta uma liberação de 13,1 MJ/kg de oxigênio consumido, princípio este adotado no calorímetro cônico, um equipamento padrão usado para cálculo da taxa de liberação de calor de amostras.

As densidades aparentes das amostras de laboratório determinadas por Frandsen foram comparáveis às obtidas no campo e variaram de 90 a 180 kg/m³. O teor de umidade e de matéria inorgânica foram expressas

como razões de massa em relação à matéria orgânica. Os teores de umidade em base úmida variaram de 0 a 0,8 e as razões inorgânicas variaram de quase zero (razão de inorgânicos na turfa natural) a 4,0. O calor liberado por unidade de massa orgânica foi independente da densidade orgânica e da razão inorgânica e variou pouco com a razão de umidade dentro dos limites de combustão. O valor médio para todas as observações (N=190) foi de 14,2 MJ/kg com um erro menor que 4,5%.

1.2.2 Incêndio em turfeiras

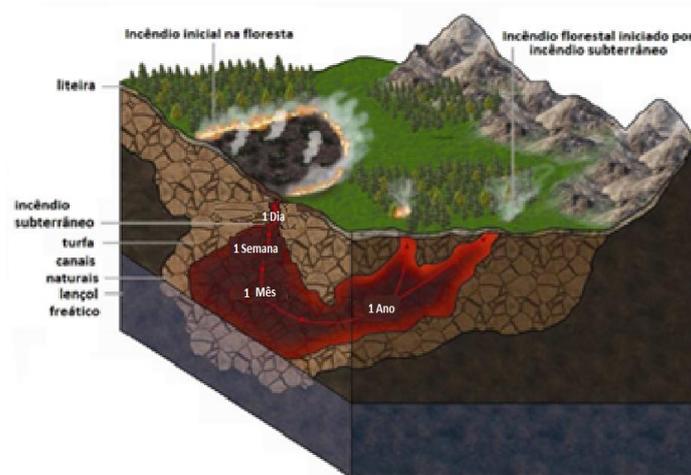
Conforme já mencionado, incêndios em turfeiras são os maiores fenômenos de combustão na Terra, e contribuem consideravelmente para as emissões anuais dos gases de efeito estufa (REIN, 2013).

Esse tipo de incêndio ocorre de forma subterrânea. O fogo se propaga sob a superfície do solo, através das camadas de turfa, com desenvolvimento lento, devido a pouca quantidade de oxigênio. Essa queima ocorre verticalmente e depois lateralmente. Esse processo é mais intenso no subsolo do que na superfície, pois o oxigênio disponível no interior do solo é maior que no perfil mais próximo à superfície, já que o produto da queima inferior sobe e ocupa o espaço do oxigênio na superfície (CHISTJAKOV, 1983).

Solos turfosos se caracterizam por apresentar elevada umidade que, em determinadas circunstâncias, quando secam, queimam facilmente (SCHUMACHER et al., 2005). Esses incêndios se propagam lentamente e sem chamas. A intensidade de calor e o poder de destruição desses incêndios são bem altos. Causam severos danos físicos, químicos e biológicos ao solo, destruindo raízes e sementes e gerando uma enorme perda de biomassa, além de favorecer a erosão (REIN, 2008; STRUMINKI, 2016).

A Figura 1.9 mostra uma ilustração de um incêndio subterrâneo iniciado na superfície que se propaga dentro do solo e emerge meses após.

Figura 1.9 – Incêndio subterrâneo iniciado na superfície que se propaga dentro do solo e emerge meses depois.



Fonte: Adaptado de Rein (2009).

Por ser um incêndio que se propaga de forma lenta e sem chama, é difícil de ser detectado. A turfa pode entrar em combustão por algum agente externo, como ponta de cigarro ou raios, que atinge a vegetação rasteira e chega até a área de turfa.

A característica mais nociva e perigosa dos incêndios de turfeiras é a densa fumaça gerada. Em um fogo de superfície, o calor lança a coluna de fumaça para a atmosfera. No incêndio de turfeiras, como as suas temperaturas superficiais são relativamente mais baixas que em um incêndio de superfície, a fumaça avança pelo solo, infiltrando-se em residências, sufocando pulmões, atrapalhando o trânsito, interrompendo voos em aeroportos, entre outros.

Por ser um incêndio subterrâneo, é difícil de ser controlado, podendo durar longos períodos, de dias a meses. O único método comprovado para extinguir esse tipo de incêndio, conforme já mencionado, é inundar novamente esse material, o que é extremamente difícil. Segundo os bombeiros russos, os incêndios subterrâneos estão entre os mais difíceis de apagar (KRAMER, 2013). É um trabalho exaustivo, executado em meio à lama e que demora semanas ou meses. Durante esse período, dificilmente se encontra qualquer chama. A vegetação queima lentamente

e libera vapores das profundezas do solo. Esses incêndios podem apresentar perigos especiais, como por exemplo, o fogo criar cavidades subterrâneas na turfeira, onde bombeiros ou seus caminhões podem afundar. Às vezes, o incêndio de turfa é totalmente controlado somente com a chuva que encharca completamente o solo.

Todos os países que possuem reservas de turfa experimentam incêndios de turfeiras. Esses incêndios são mais comuns nas turfeiras tropicais, embora o aquecimento global possa modificar essa situação. A dificuldade de contenção de um incêndio de turfeiras depende da profundidade em que se encontra a turfa e do seu teor de umidade.

1.3 História

A turfa foi reconhecida como fonte de energia nos séculos XVI a XVIII na Finlândia, na antiga União Soviética e na Irlanda, e seu uso se dava principalmente para aquecimento e uso doméstico (AGUIAR, 1987).

Os pesquisadores que iniciaram o estudo da turfa foram os finlandeses, mais precisamente da Academia de Turko. Pehr Adrin Gadd (1727-1797) foi o primeiro a propor um sistema classificatório e outro para a determinação da qualidade da turfa na jazida. Em 1759, Gadd e PehrKalm (1716-1779) publicaram um trabalho sobre o uso da turfa como combustível e em 1763 estabeleceram um método para a drenagem das zonas turfosas, viabilizando a agricultura e o reflorestamento nas áreas drenadas. Já na primeira metade do século XIX, fez-se a primeira grande drenagem de turfeira na Finlândia.

Os primeiros briquetes (blocos compactos) de turfa foram produzidos em 1865, na Irlanda. Em 1870 sua produção foi interrompida devido ao carvão produzido na Inglaterra. Sua exploração foi reiniciada 50 anos depois, na Irlanda, para ser utilizada em equipamentos. Em 1934, foi criada a empresa estatal *Turf Development Board*, responsável por quase toda a produção de turfa na Irlanda. Na época, cerca de 18 % da energia produzida no país era obtida da turfa (AGUIAR, 1987).

Na Alemanha, a turfa era utilizada como combustível, na fabricação de cerâmica e vidro. Em 1923, o consumo de turfa chegou a 3 milhões de toneladas, mas em 1977 a demanda reduziu-se para 221000 toneladas, para uso agrícola (AGUIAR, 1987).

No Brasil, a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) realizou pesquisas de prospecção de turfa no Nordeste em 1983. A área abrangeu praticamente toda a faixa costeira dos estados do Ceará, Piauí e Maranhão. Foram constatadas cinco diferentes áreas de depósitos turfáceos no Maranhão e nenhuma nos outros estados.

Na década de 30, a turfa foi descoberta no Vale do Paraíba, São Paulo casualmente, e começou a ser utilizada como combustível. A partir de 1936, começaram a surgir publicações nacionais sobre as qualidades da turfa como combustível. A Estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB) consumiu turfa de 1942 a 1945 em substituição ao carvão mineral importado, que apresentava problemas de suprimento devido à Segunda Guerra Mundial. O que dificultava a utilização da turfa era sua baixa produção, pois não havia uma tecnologia de lavra (MONTICELLI, 1990).

A partir de 1979, a turfa no Brasil começou a ser objeto de pesquisa geológica, principalmente pela CPRM.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 2016) possui uma vasta experiência nos campos geológico e tecnológico do uso da turfa para fins energéticos, principalmente nos anos 80. Esses estudos buscaram conhecer as reservas brasileiras e suas características, além de levantarem informações disponíveis de outros países, estabelecendo programas de estudo e avaliações tecnológicas. Esses estudos estimaram as reservas para o estado de São Paulo.

1.4 Objetivo do trabalho

O presente trabalho visa determinar características físico-químicas de amostras de turfa coletadas em uma área localizada no município de São José dos Campos, no estado de São Paulo, analisar a decomposição

térmica da turfa por termogravimetria e por calorimetria exploratória diferencial, e avaliar os diversos aspectos da pirólise e queima da turfa em um calorímetro cônico. Essas características determinadas da turfa poderão auxiliar na verificação dos riscos de incêndio in loco.

Os resultados a serem obtidos irão possibilitar uma melhor compreensão do processo de queima da turfa, fornecerão dados para auxiliar na prevenção, controle e combate a incêndios de turfa, incluindo o fornecimento de dados experimentais para estudos teóricos e simulações numéricas.

2 METODOLOGIA

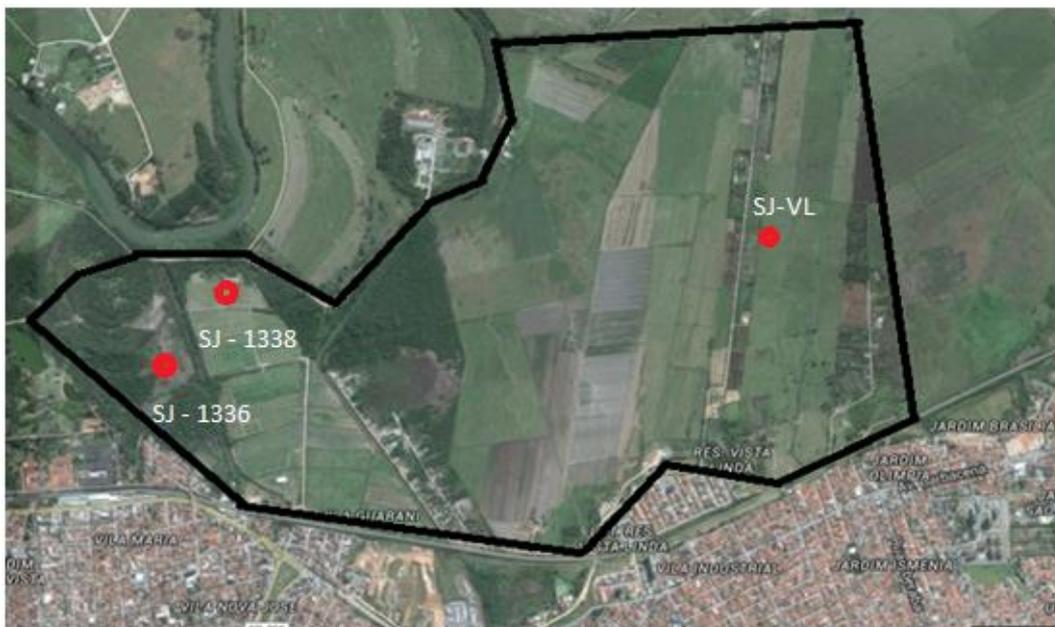
Inicialmente foram realizadas coletas de amostras de turfa na região SJ – 2, no município de São José dos Campos, SP. As amostras de turfa foram armazenadas em sacos plásticos do tipo *zip lock*, mantidos à sombra e à temperatura ambiente.

Em seguida foram efetuadas análises físico-químicas, termogravimétricas (TGA) e de calorimetria diferencial (DSC) do material turfoso coletado. Por último foi realizada a queima de amostras de turfa em um calorímetro cônico para determinação das taxas de liberação de calor e da perda de massa com aquecimento externo, além da análise das emissões de gases.

2.1 Coletas de amostras

A figura 2.1 mostra os locais onde foram obtidas amostras de turfa para as caracterizações físico-químicas e os testes de pirólise e combustão.

Figura 2.1 – Localização das coletas de amostras.



Fonte: Produção da autora.

Foram realizadas três coletas de amostras em dois locais, usando trado manual e tomando-se o cuidado de não alterar estrutural e físico-quimicamente as amostras retiradas.

2.1.1 Primeira coleta

Coleta realizada pela autora em fevereiro de 2016 em uma fazenda do Bairro Vista Linda, em São José dos Campos, nas coordenadas 23°15'54" S / 45°85'52" O.

Foi realizado um furo de 60 cm de profundidade para coleta de material usado nas primeiras caracterizações e primeiros testes experimentais. O furo foi denominado de SJ-VL. Visto que era período de chuva, o solo se encontrava encharcado, como se pode observar na Figura 2.2. Abaixo de 60 cm encontrava-se o lençol freático, impedindo a retirada de amostras mais profundas.

Figura 2.2 – Local da primeira coleta de amostras.



Fonte: Produção da autora.

2.1.2 Segunda coleta

Coleta realizada pela equipe do Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015) em julho de 2016 na área vizinha à Secretaria de Meio Ambiente (SEMEA), dentro do Parque da Cidade de São José dos Campos.

Três furos, próximos cerca de 50 cm, foram realizados no ponto denominado SJ-1336, com profundidades até 4,5 m, e quatro furos, próximos cerca de 50 cm, foram realizados no ponto denominado SJ-

1338, com profundidades até 6,4 m. Estes pontos são localizados nas posições 23°10'11,61" S / 45°52'52,47" O e 23°9'58,65" S / 45°45' 35" O, respectivamente.

A Figura 2.3 mostra o local dos furos realizados durante a segunda campanha de sondagem, o equipamento utilizado e um dos furos realizados.

Figura 2.3 – Segunda coleta de amostras.



(a)



(b)



(c)

(a) o local dos furos realizados; (b) equipamento utilizado; e (c) furo realizado.

Fonte: Produção da autora.

2.1.3 Terceira coleta

A terceira coleta de amostras foi executada pela autora em novembro de 2016, no mesmo local dos furos SJ-1336 ($23^{\circ}10'11,61''\text{S}$ / $45^{\circ}52'52,47''\text{O}$) da segunda coleta, para a obtenção de material adicional para testes. O local apresentou crescimento significativo da vegetação, conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Foto local da terceira coleta.



Fonte: Produção da autora.

2.2 Classificação da turfa

A classificação das amostras de turfa foi realizada através de análise visual. A classificação das amostras da primeira coleta foi feita pela autora, enquanto as classificações das amostras da segunda e terceira coletas foram feitas pelos geólogos da equipe do Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015).

A classificação detalhada das amostras é apresentada no Capítulo 3.

2.3 Medidas das características físico-químicas das amostras de turfa

Foram medidos o teor de umidade, a densidade aparente, a densidade da fase sólida, o poder calorífico superior e o teor de CHNS das amostras de turfa.

2.3.1 Teor de umidade

O teor de umidade pode ser determinado em base seca ou em base úmida.

O teor de umidade em base úmida é dado por:

$$h = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100 \quad (2.1)$$

onde h = umidade em base úmida [%]
 m_u = massa úmida da amostra [g]
 m_s = massa seca da amostra [g]

O teor de umidade em base seca é dado por:

$$w = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.2)$$

onde w = umidade em base seca [%]

Para a determinação do teor de umidade, foram verificadas inicialmente as normas ASTM D2974-87 método A e a norma ABNT NBR16097.

Norma ASTM D2974-87 método A

De acordo com esta norma, pesam-se 50 g de amostra em um cadinho de porcelana, que são colocadas em estufa a 105 °C por 16 h ou até massa constante, pesando de hora em hora. Após esse procedimento, coloca-se a amostra em dessecador para resfriá-la e pesa-se novamente para o cálculo do teor de umidade.

Norma ABNT NBR16097

Seguindo esta norma, pesam-se 5 g de amostra de turfa em um cadinho de porcelana, que são em seguida colocadas em estufa a 65 °C por 12 h e depois pesa-se a amostra. Então coloca-se novamente a amostra em estufa a 105 °C por 12 h. Após essa etapa, a amostra é colocada em dessecador para resfriamento, posteriormente pesando-a para o cálculo do teor de umidade.

As normas ASTM D2974-87 método A e ABNT NBR16097 foram utilizadas para a definição do procedimento ideal para determinação do teor de umidade. A norma ASTM D2974-87 é uma norma internacional para a determinação do teor de umidade, teor de cinzas e teor de matéria orgânica para turfa e outros solos, como, por exemplo, a argila orgânica. Esta norma não foi utilizada neste trabalho devido à alta temperatura de secagem, que é de 105 °C, podendo ocorrer a perda de voláteis durante o processo. A norma ABNT NBR16097 é utilizada para a determinação do teor de umidade de solos em geral, não havendo uma norma brasileira específica para a turfa.

Foi desenvolvido um procedimento para a secagem da turfa, denominado INPE/TURFA, utilizado neste trabalho para a determinação do teor de umidade de turfa.

Procedimento INPE/TURFA

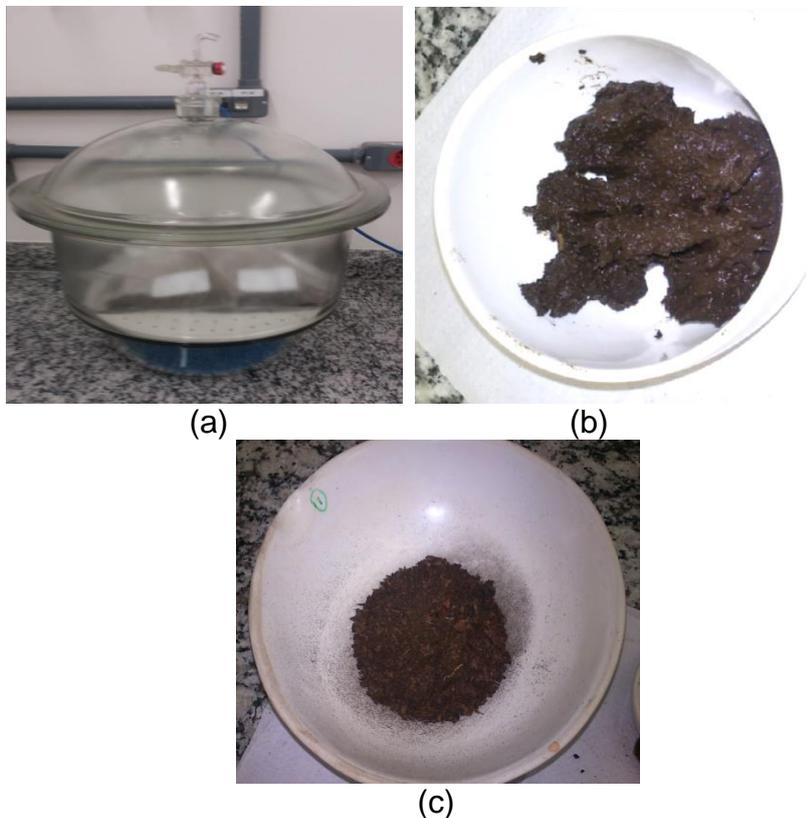
Pesam-se 50 g de amostra dentro de um cadinho de porcelana, com uma balança digital de precisão 1 mg. Coloca-se a amostra em uma estufa a 80 °C com recirculação secando por 24 horas. Em seguida, imediatamente, deixa-se a amostra em dessecador para resfriar e pesa-se para a determinação do teor de umidade.

Caso se adotasse uma temperatura de secagem de 60 °C o tempo de estabilização (secagem) da massa da amostra chegava a 4 dias.

Neste experimento foi utilizada estufa marca Nova Ética.

A Figura 2.5 mostra o dessecador usado, uma amostra de turfa úmida e uma amostra de turfa seca analisadas neste trabalho.

Figura 2.5 – Dessecador (a); amostra de turfa úmida (b); e amostra de turfa seca (c).



Fonte: Produção da autora.

2.3.2 Moagem das amostras de turfa

Após a secagem, as amostras de turfa foram trituradas em um almofariz e peneiradas, em peneira 60 mesh, para diminuir o tamanho das partículas e aumentar a área superficial de contato da amostra, tornando desta forma, todas as amostras mais homogêneas, passíveis de comparação e, portanto, mais representativas. Os testes de massa específica, poder calorífico e análise termogravimétrica foram realizados com essas amostras trituradas. A Figura 2.6 mostra o almofariz utilizado na moagem das amostras de turfa.

Figura 2.6 – Almofariz.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 2.7 apresenta um exemplo de amostras de material turfoso antes da secagem (a), após a secagem e semi-triturada (b) e após homogeneização com trituração no almofariz e posterior peneiração (c).

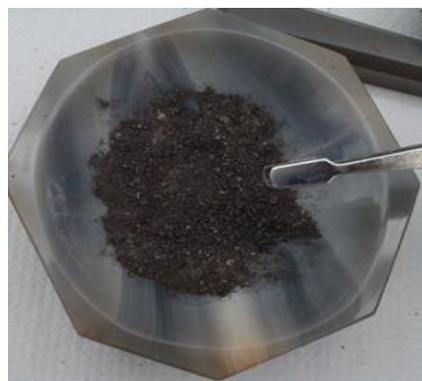
Figura 2.7 – Amostras de turfa: úmida (a), seca/semi-triturada (b) e peneirada (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Produção da autora.

2.3.3 Massa específica

A massa específica ou densidade absoluta é a razão entre a massa e o volume ocupado por um corpo ou substância. A massa específica é denominada aparente quando se inclui no cálculo do volume os espaços vazios que podem existir no interior da amostra. A massa específica da fase sólida, verdadeira, real ou de partícula é quando no cálculo do volume se considera apenas a parte sólida da amostra, livre dos espaços vazios.

Um material sólido, com formato regular, como um cubo ou uma esfera, pode ter sua massa específica rapidamente determinada, pois a obtenção do volume pode ser feita através de medidas diretas nas dimensões do objeto. A dificuldade na determinação do volume aumenta quando o objeto tem formato irregular ou quando se consideram substâncias ou sólidos particulados na forma de granulados ou pó, o que representa o objetivo deste trabalho, a turfa.

Nesse trabalho, as massas específicas aparente e da fase sólida da turfa foram determinadas com amostras secas e trituradas.

Massa específica aparente

A massa específica aparente de uma amostra de turfa foi determinada pela fórmula:

$$d_{ap} = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

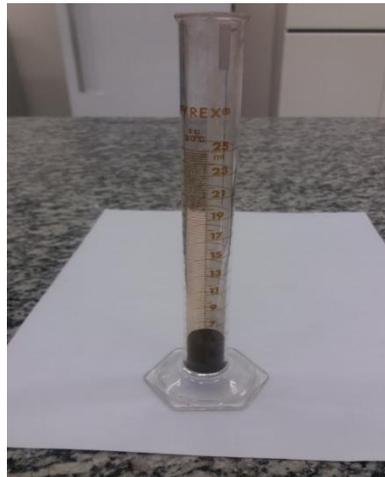
onde d_{ap} = massa específica aparente [g/cm³]

m = massa da amostra [g]

V = volume da amostra [cm³]

Para a determinação do volume da amostra, foi utilizada uma proveta de 25 ± 0,5 mL. A massa, correspondente a um volume de 5 mL de amostra, foi medida em uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUX220, que possui exatidão de 1mg. A Figura 2.8 mostra a proveta e a balança utilizada no experimento.

Figura 2.8 – Proveta (a) e balança analítica (b) para medidas de massa específica aparente.



(a)



(b)

Fonte: Produção da autora

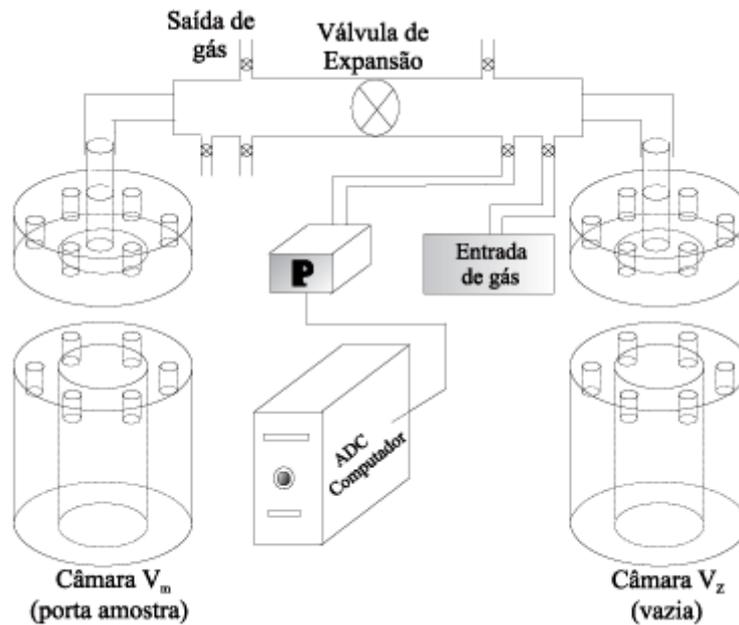
Massa específica da fase sólida

A massa específica da fase sólida da amostra de turfa foi determinada por picnometria a gás. Um picnômetro a gás determina o volume real de sólidos, pela variação da pressão de um gás, numa câmara de volume conhecido. Neste experimento, utilizou-se o gás hélio, que além de ser inerte, penetra facilmente nos poros da amostra, devido ao pequeno tamanho de seus átomos, permitindo assim, determinar o volume do sólido com mais rigor. A Figura 2.9 apresenta um desenho esquemático de um picnômetro a gás.

Como se pode verificar na Figura 2.9, duas câmaras são conectadas por uma válvula de expansão, sendo uma delas com volume V_m , utilizado como porta amostra, e a outra com volume V_z , que permanece vazia, sendo utilizada na pressurização do sistema.

Antes de iniciar a análise, a amostra, colocada no porta-amostra, é sujeita a uma desgaseificação que consiste em repetidas purgas com hélio, para a remoção de impurezas e umidade.

Figura 2.9 – Desenho esquemático de um picnômetro a gás.



Fonte: Smith (1996).

Depois, leva-se todo o sistema à pressão atmosférica, isola-se a câmara vazia, fechando a válvula de expansão e pressurizando a câmara que contém a amostra até uma pressão P_1 . Em seguida, a válvula de expansão é aberta, ocorre um abaixamento da pressão para P_2 . Conforme Smith (1996), o volume da amostra pode ser obtido considerando comportamento ideal do gás hélio:

$$P_1(V_m - V_s) = P_2(V_m - V_s + V_z) \quad (2.4)$$

onde P_1 = pressão no porta amostra [Pa]
 V_m = volume da câmara da amostra [cm³]
 V_s = volume da amostra [cm³]
 P_2 = pressão na câmara vazia [Pa]
 V_z = volume da câmara de expansão [cm³]

dando

$$V_s = V_m - \frac{V_z}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (2.5)$$

A massa específica da fase sólida da amostra é então calculada pelo equipamento, através da relação entre a massa da amostra (introduzida no equipamento) e o volume calculado pela equação 2.5.

A principal vantagem deste método consiste na sua capacidade para medir apenas o volume da substância, descontando do volume total de todos os poros da amostra (a menos que estes estejam fechados ou inacessíveis ao gás). Como desvantagem, tem-se o fato das dimensões das amostras terem de ser reduzidas, pois o porta amostra em geral é pequeno.

A exatidão e a precisão deste equipamento para a determinação da massa específica dependem da pureza da amostra e da pureza do gás de análise.

O picnômetro a gás, modelo Ultrapyc 1200e, da marca Quantachrome, mostrado na Figura 2.10, foi utilizado para a determinação da massa específica real das amostras de turfa. O equipamento tem precisão de 0,02%, a pressão $P_1 = 117,2$ kPa e o porta amostra tem capacidade máxima de 50 cm³. No entanto, recomenda-se que somente 2/3 desse volume sejam preenchidos.

Figura 2.10 – Picnômetro a gás, modelo Ultrapyc 1200e.



Fonte: Produção da autora.

2.3.4 Poder calorífico

Poder calorífico é a maior quantidade de calor que pode ser obtida a partir da combustão completa de uma unidade de massa de combustível.

O hidrogênio é a substância química com maior poder calorífico (PCI = 121 MJ/kg), enquanto que o carbono, elemento básico do carvão, é o que apresenta menor poder calorífico (PCI = 34 MJ/kg). Como um combustível é constituído basicamente de carbono e hidrogênio, quanto mais rico em hidrogênio for o combustível, maior será seu poder calorífico.

A água é um dos produtos da queima de qualquer combustível. Dependendo da fase desta água, a quantidade de calor liberada muda. Assim, costuma-se fornecer dois valores para o poder calorífico de um combustível: o superior (PCS) e o inferior (PCI). O PCS representa o calor liberado pela combustão tendo toda a água resultante na fase líquida, e o PCI representa o calor liberado pela combustão estando toda a água resultante no estado gasoso.

Dessa forma, a diferença entre o PCS e o PCI é a entalpia de formação da água formada na reação e da água previamente existente no combustível, mostrado pela relação:

$$PCI = PCS - 2440(9H + W) \quad (2.6)$$

onde PCI = poder calorífico inferior (kJ/kg)

PCS = poder calorífico superior (kJ/kg)

H = teor de hidrogênio no combustível (kg de hidrogênio/ kg de combustível seco)

W = teor de umidade do combustível (kg de água / kg de combustível seco)

O PCS é normalmente medido em laboratório e o PCI é obtido utilizando-se a Equação 2.6. Esta equação está descrita no manual de instruções do calorímetro IKA C200 que utiliza a norma DIN 51900.

O calorímetro é o equipamento utilizado em laboratório para a análise experimental do poder calorífico. Esses aparelhos são adiabáticos, ou seja, não trocam calor com o ambiente. Dentro do calorímetro, ocorre a combustão de uma massa conhecida de combustível. O calor gerado é transferido para a massa de água, elevando a temperatura. Assim, obtém-se o valor do poder calorífico superior.

Neste experimento, foi utilizado o calorímetro IKA C200 mostrado na Figura 2.11, seguindo-se a norma DIN 51900. Neste equipamento, o PCS da amostra é determinado pela equação 2.7.

$$PCS = \frac{C\Delta T - Q_{ext,1} - Q_{ext,2}}{m} \quad (2.7)$$

onde PCS = valor do poder calorífico [J/g]
C = calor específico do sistema [J]
 ΔT = aumento da temperatura da água no interior da célula de medição [K]
 $Q_{ext,1}$ = correção para a energia térmica gerada pelo fio de algodão, utilizado como auxiliar de ignição [J]
 $Q_{ext,2}$ = correção para a energia térmica gerada por outros compostos [J]
 m = massa da amostra [g]

Figura 2.11 – Calorímetro IKA C200.



Fonte: Produção da autora.

2.4 Análise elementar da turfa

A análise elementar das amostras de turfa refere-se à quantidade de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) presente na turfa. O equipamento utilizado foi o Analisador de CHNS/O 2400 Series II, Perkin Elmer, mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Analisador de CHNS Perkin Elmer.



Fonte: Produção da autora.

2.5 Decomposição térmica da turfa

Esta seção descreve a análise térmica das amostras de turfa mediante a análise termogravimétrica (TGA) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC).

A TGA é uma técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da programação da temperatura em um ambiente de atmosfera controlada (IONASHIRO, 1974).

O equipamento para esta análise é composto basicamente de uma termobalança que permite a pesagem contínua da amostra em função da temperatura, seja ela aquecida ou resfriada.

Os principais componentes de uma termobalança são: a balança de precisão, cadinhos de material inerte, forno, termopares e um sistema de passagem de gás (purga). Neste equipamento, a amostra é inserida em um cadinho que é posicionado sobre um suporte ligado à balança dentro do forno. A temperatura é programada para variar no tempo segundo critérios pré-definidos, enquanto a balança fornece os dados da massa da amostra em função deste tempo. O sistema de controle atmosférico é muito importante, pois os gases presentes durante a análise podem ou não reagir com a amostra, interferindo assim nas variações de massa.

A DSC é uma técnica onde se mede a diferença de energia (entalpia) entre a amostra e o material de referência, enquanto são submetidos a uma programação controlada de temperatura (IONASHIRO, 1974).

Para amostras de turfa, utilizando a técnica DSC, pode-se observar pelo gráfico gerado, a ocorrência de eventos endotérmicos e exotérmicos.

O analisador térmico simultâneo utilizado neste trabalho é o modelo SDT Q600, da marca TA, mostrado na Figura 2.13. Este equipamento permite a medição simultânea da variação de peso (TGA) e do fluxo de calor diferencial (DSC) na mesma amostra, desde a temperatura ambiente até 1300 °C.

Figura 2.13 – Analisador térmico simultâneo, modelo SDT Q600, marca TA.



Fonte: Produção da autora.

O processo de combustão da turfa, analisado neste equipamento, consiste de um estágio de evaporação de água e mais dois estágios consecutivos, a decomposição oxidativa da matéria orgânica da turfa e a oxidação do carvão (CHEN et al., 2011).

2.5.1 Decomposição da turfa

A turfa é composta principalmente por celulose, lignina e ácidos húmicos.

A celulose é um polissacarídeo formado exclusivamente por unidades de β -D-anidroglicopiranoose, unidas por ligações glicosídicas do tipo $\beta(1-4)$ (SJÖSTRÖM, 1993; ROWELL et al., 2005). Esse polímero se decompõe em temperaturas entre 315 e 400 °C (YANG, 2007).

As ligninas são macromoléculas tridimensionais, amorfas e ramificadas, apresentam o fenilpropano como unidade básica, unidos por ligações do tipo éter (C-O-C) e carbono-carbono (C-C) (Rowell et al., 2005). Sua decomposição térmica ocorre entre 350 e 500 °C (CONESA, 1995).

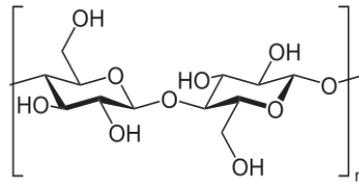
O ácido húmico é o principal constituinte das substâncias húmicas. Ele é produzido a partir da degradação da matéria orgânica morta. É uma mistura de diversos ácidos com grupamentos carboxila e fenóis (YAMAUCHI et al., 1984). As principais etapas da degradação térmica das substâncias húmicas são a eliminação dos grupos funcionais entre 250 e 300 °C e decomposição do “núcleo central” a uma temperatura acima de 400 °C (MACCARTHY et al., 1985).

A Figura 2.14 mostra as moléculas orgânicas celulose, lignina e ácidos húmicos, presentes na turfa.

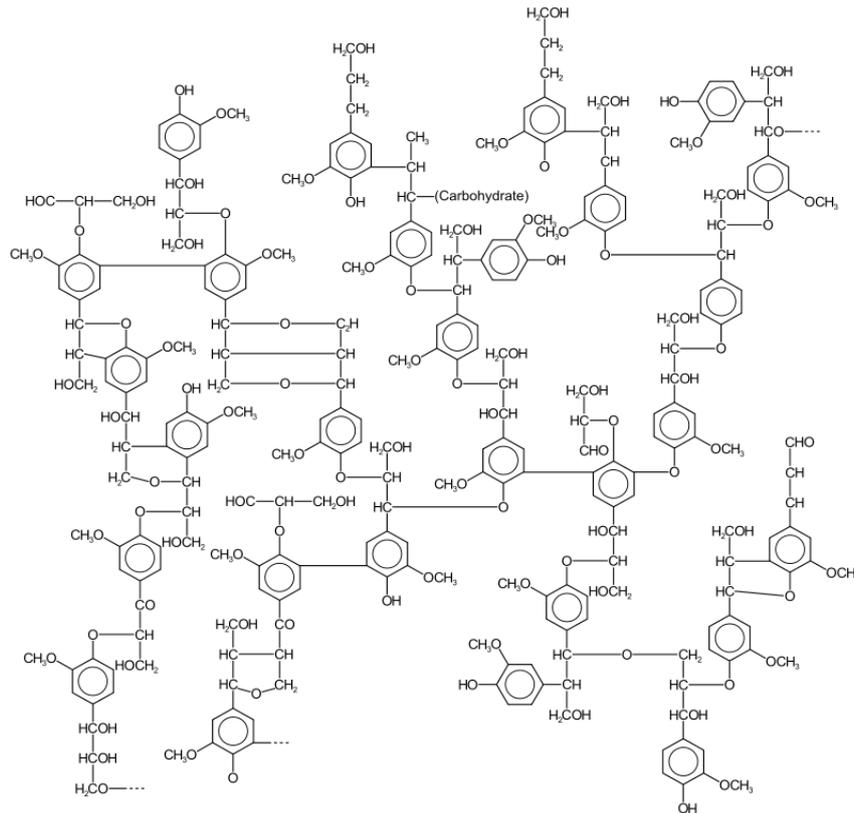
2.5.2 Parâmetros Cinéticos

Técnicas termoanalíticas podem ser utilizadas para a realização de estudos de reações heterogêneas, com o intuito de se determinarem os parâmetros cinéticos, como a energia de ativação (E_a), o fator pré-exponencial ou fator de frequência (A) e a ordem de reação (n) (BROWN, 2001). É possível mensurar a variação de uma propriedade da amostra quando esta é aquecida (estudo cinético dinâmico) ou mantida a uma temperatura constante (estudo cinético isotérmico). Quando a reação envolve variação de massa (Δm) em função do aquecimento, esse estudo cinético pode ser realizado por termogravimetria.

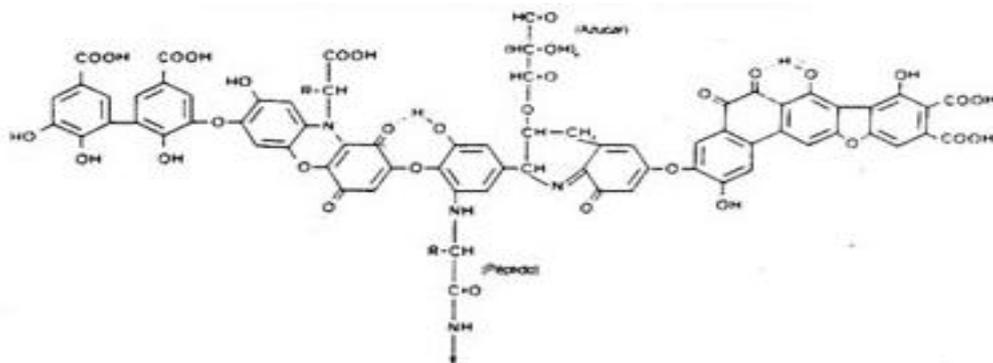
Figura 2.14 – Moléculas de celulose (a), lignina (b) e ácido húmico (c) presentes na turfa.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Nishima et al (2002), Gutiérrez et al (2006) e Stevenson (1994).

No estudo de casos não isotérmicos, os métodos envolvem o aquecimento das amostras sob uma ou mais razões de aquecimento (β) constantes. Estes métodos produzem resultados dependentes da temperatura.

O método descrito por Ozawa (Ozawa, 1965) utiliza uma aproximação linear com base na integração da equação de Arrhenius. A formulação do método de Ozawa, usado neste trabalho, é descrita a seguir.

Se a decomposição de uma amostra por termogravimetria ocorrer com um aumento linear de temperatura $T = T_o + \beta t$, onde T_o é a temperatura inicial e β é a taxa de aquecimento (K/s) da amostra, então a taxa de consumo do material da amostra pode ser aproximada por:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (2.8)$$

onde α é a conversão do material da amostra, definida por:

$$\alpha = \frac{m_o - m}{m_o - m_f} \quad (2.9)$$

onde m é a massa instantânea, m_o a massa inicial e m_f a massa final da amostra.

As funções $k(T)$ e $f(\alpha)$ são dependentes, respectivamente, da temperatura T e da conversão α da amostra que varia de 0 a 1.

A dependência da temperatura com a taxa de perda de massa pode ser relacionada através da equação de Arrhenius:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{R_o T}\right) \quad (2.10)$$

onde E_a é a energia de ativação, A é o fator pré-exponencial e R_o a constante universal dos gases.

A forma mais utilizada para $f(\alpha)$ é

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (2.11)$$

onde n é a ordem da reação.

Substituindo as equações (2.9) e (2.10) na equação (2.8), fornece:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} = k(1 - \alpha)^n \quad (2.12)$$

Integrando da temperatura inicial T_0 , quando a conversão é igual a zero, até uma temperatura qualquer T , quando a conversão é α , obtém-se:

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1 - \alpha)^n} = \frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T k dT \quad (2.13)$$

Chamando $F(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1 - \alpha)^n}$, então para $n = 1$, tem-se $F(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$ e

para $n = 2$, tem-se $F(\alpha) = \alpha / (1 - \alpha)$.

Pode-se escrever:

$$F(\alpha) = \frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T A \exp\left(-\frac{E_a}{R_o T}\right) dT \quad (2.14)$$

Denominando $x = \frac{E_a}{R_o T}$, então $T = \frac{E_a}{R_o x}$ e $dT = -\frac{E_a}{R_o x^2} dx$. Logo,

$$F(\alpha) = \frac{E_a}{R_o} \frac{A}{\beta} \int_{x_0}^x -\frac{e^{-x}}{x^2} dx \quad (2.15)$$

onde a função $-e^{-x}/x^2$ pode ser expressa em série de potências ao redor de $x = 0$:

$$-\frac{e^{-x}}{x^2} = -\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n (-1)^n}{(2+n)!} = -\frac{1}{x^2} + \frac{1}{x} - \frac{1}{2} + \frac{x}{6} - \frac{x^2}{24} + \frac{x^3}{120} - \frac{x^4}{720} + \dots \quad (x \neq 0) \quad (2.16)$$

Esta série converge para $x > 0$ e pode ser integrada de x_0 a x , fornecendo o polinômio $p(x)$:

$$p(x) = -\int_{x_0}^x \frac{e^{-x}}{x^2} dx = \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} + \ln \frac{x}{x_0} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x_0^{n+1} - x^{n+1})(-1)^n}{(n+1)(2+n)!} \quad (x_0 > x > 0) \quad (2.17)$$

Uma vez que $x = E_a / R_o T$, tem-se

$$F(\alpha) = \frac{E_a}{R_o} \frac{A}{\beta} p\left(\frac{E_a}{R_o T}\right). \quad (2.18)$$

O polinômio $p\left(\frac{E_a}{R_o T}\right)$ da equação (2.18) é a temperatura integral definida por Doyle (1961) que a aproximou por uma função linear. Marconcini et al (2007) mencionam a seguinte relação válida para $20 < \frac{E_a}{R_o T} < 60$:

$$\ln p\left(\frac{E_a}{R_o T}\right) = -5,3305 - 1,0516 \frac{E_a}{R_o T} \quad (2.19)$$

Tirando o logaritmo natural de (2.19), fica-se com:

$$\ln \beta = \ln A + \ln \frac{E_a}{R_o} - \ln F(\alpha) - 5,3305 - 1,0516 \frac{E_a}{R_o T} \quad (2.20)$$

Conforme a equação (2.20), para uma conversão fixa α , pode-se traçar uma curva entre $\ln \beta$ e $1/T$, obtida das curvas de TGA em várias razões de aquecimento constantes β .

A curva dada por (2.20) corresponde a uma linha reta com equação:

$$y = mx + c \quad (2.21)$$

onde

$$x = 1/T \quad (2.22)$$

$$m = -1,0516 E_a / R_o \quad (2.23)$$

$$y = \ln(\beta) \quad (2.24)$$

$$c = \ln A + \ln \frac{E_a}{R_o} - \ln F(\alpha) - 5,3305 \quad (2.25)$$

Portanto, a inclinação da linha reta é $m = -1,0516E_a/R_o$ e o ponto de interseção com o eixo vertical é $c = \ln\left(\frac{AE_a}{R_o}\right) - 5,3305 - \ln F(\alpha)$, permitindo assim a determinação da energia de ativação E_a e do fator pré-exponencial A da constante de Arrhenius.

2.6 Queima em calorímetro cônico

O calorímetro cônico é um equipamento utilizado para determinação das características de inflamabilidade de materiais celulósicos e polímeros, incluindo medida da massa instantânea, taxa de queima, taxa de liberação de calor e emissões. Foi utilizado neste trabalho para análise da queima e das emissões de amostras de turfa. Diferentemente do TGA e DSC, permite o estudo da queima de amostras maiores (cerca de 0,5 kg de amostra de turfa) e em condições similares a incêndios de turfa. Este equipamento encontra-se no laboratório de ensaios de combustão do LCP/INPE, mostrado na Figura 2.15, e foi desenvolvido por Castro (2005).

Figura 2.15 – Calorímetro cônico.



Fonte: Produção da autora.

Para a realização de ensaios no calorímetro cônico, foram moldadas amostras em uma prensa hidráulica, utilizando 7 toneladas-força. A Figura 2.16 mostra o suporte utilizado para a prensagem das amostras. As

amostras formadas possuíam 10 cm x 10 cm x 7 cm, totalizando um volume de 700 cm³, como mostra a Figura 2.17.

Figura 2.16 – Suporte para prensagem das amostras.



Fonte: Produção da autora.

Figura 2.17 – Amostra de turfa prensada.



Fonte: Produção da autora.

Para a realização deste ensaio, essas amostras foram colocadas em um cadinho, onde o fundo foi isolado termicamente com uma placa de lã de vidro e, em volta do conjunto amostra e cadinho, foi colocado papel alumínio, para evitar perdas de calor durante o ensaio, como mostra a Figura 2.18.

Figura 2.18 – Amostra para ensaio em calorímetro cônico.

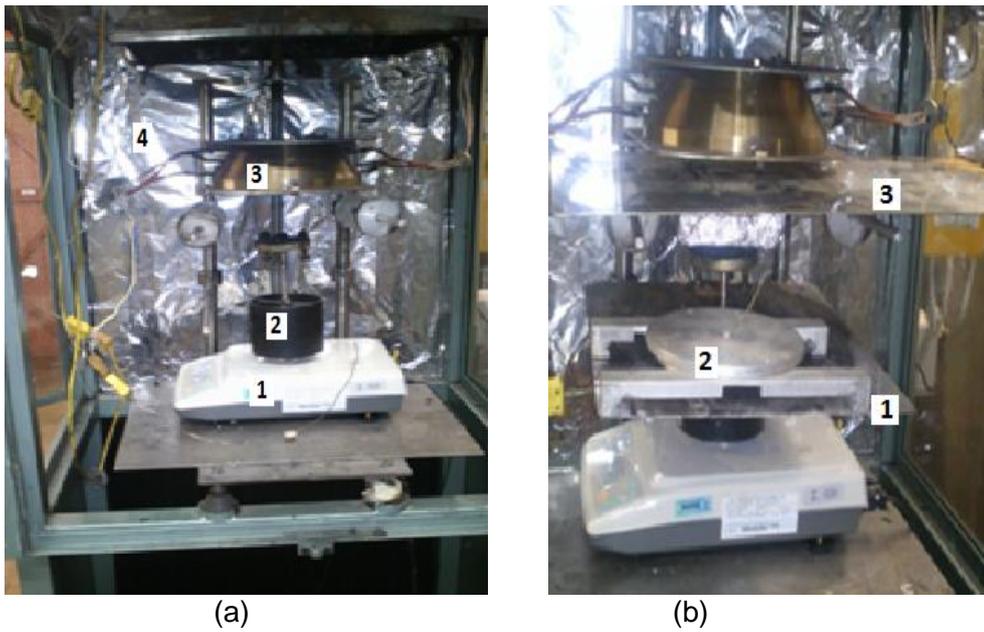


Fonte: Produção da autora.

O calorímetro cônico é mostrado na Figura 2.19.a e Figura 2.19.b. Na Figura 2.19.a temos a balança semi-analítica, marca Gehaka (1), o suporte de amostra (2) e o cone aquecedor (3). Ao fundo do calorímetro cônico, pode-se observar o papel alumínio que foi colocado (4), para evitar o aquecimento na bancada, que está localizada atrás do calorímetro e contém o microcomputador, os controles de aquecimento e do analisador, além do painel de disjuntores. Na Figura 2.19.b, observa-se uma placa sobre a balança (1), que deve refletir a energia incidente e, assim, proteger a balança. Acima dessa placa, tem-se um suporte onde está um termopar (2), que mede a temperatura que está chegando na amostra. A placa que se encontra sob o cone de aquecimento (3), é utilizada para que a energia seja confinada até que a potência pré-determinada seja atingida, sendo assim retirada.

A Figura 2.20 mostra uma amostra de turfa durante o ensaio realizado no calorímetro cônico.

Figura 2.19 – Calorímetro cônico.



Fonte: Produção da autora.

Figura 2.20 – Amostra de turfa durante o ensaio realizado no calorímetro cônico.



Fonte: Produção da autora.

Na bancada experimental, encontram-se as instalações elétricas, uma coifa para a exaustão de gases, um ventilador centrífugo para induzir o escoamento dos gases de combustão pela coifa, controladores de potência elétrica, um microcomputador para a aquisição de dados, banho de gelo e filtros pré-tratamento para os gases de combustão antes de entrarem no analisador, termopares e mostradores digitais de temperatura.

Para o pré-tratamento dos gases de combustão, utilizam-se dois frascos lavadores e uma sequência de filtros associados a um banho de gelo, como mostra a Figura 2.21.

Figura 2.21 – Frascos lavadores, filtros e banho de gelo.



Fonte: Produção da autora.

Para a aquisição de dados de evolução da massa, será utilizada uma balança digital acoplada a um microcomputador.

Para acompanhar temperaturas e vazões durante o experimento, termopares e placa de orifício foram instalados na tubulação de exaustão dos gases. No controle de vazão dos gases, utilizou-se um inversor de frequência associado ao motor de um ventilador centrífugo. O inversor possibilita o controle da frequência da energia elétrica proveniente da rede, permitindo o controle da rotação do motor do ventilador, permitindo a escolha de uma vazão ideal dos gases de combustão, para que não ocorra seu acúmulo na coifa e não ocorra também sua diluição demasiada, dificultando a análise contínua.

Os analisadores de gases mediram as concentrações de CO, CO₂, O₂, NO e UHC. Para as medições de CO, CO₂ e O₂, foi utilizado o analisador de gases SIDOR, que possui como faixa de medição de 0 a 12% para o CO, de 0 a 15% para o CO₂ e de 0 a 21% para o O₂, com precisão de 1% (GAMBOA, 2016). Para a medida do NO foi utilizado um analisador de gases da marca Rosemount, modelo 951A, com uma faixa de medição de 0 a 10000 ppm e precisão de 0,5% (LACAVA, 2000). Para a análise do

UHC foi utilizado um analisador de gases da marca Rosemount, modelo 400A, com precisão de 1% (GEMAQUE, 2012).

2.6.1 Determinação da taxa de liberação de calor

A taxa de liberação de calor representa a energia ou calor liberado por unidade de massa de O_2 por unidade de tempo durante o processo de combustão.

Para a determinação da taxa de liberação de calor (\dot{q}), consideram-se apenas as medidas de concentração de O_2 , CO_2 e CO , sendo eliminados o vapor d'água e os particulados dos gases da exaustão. A equação 2.26 fornece o valor da taxa de liberação de calor por unidade de área (GEMAQUE, 2012).

$$\dot{q} = 1,1EX_{O_2,e} \left(\frac{\phi - 0,172(1-\phi) \frac{X_{CO}}{X_{O_2}}}{(1-\phi) + 1,105\phi} \right) C \sqrt{\frac{\Delta P}{T}} \quad (2.26)$$

onde \dot{q} = taxa de liberação de calor por unidade de área [W/m^2]

ϕ = depleção do O_2

C = constante de calibração do calorímetro cônico

ΔP = variação da pressão durante a exaustão dos gases [Pa]

T = temperatura de exaustão dos gases [K]

E = valor médio da energia liberado por kg de O_2 consumido [kW/kg de O_2]

$X_{O_2,e}$ = fração molar do O_2 na entrada do analisador de gases

X_{O_2} = fração molar do O_2 na saída do analisador de gases

X_{CO} = fração molar do CO na saída do analisador de gases

Para combustíveis orgânicos, considera-se o valor de $E = 13,1$ MJ/kg de O_2 consumido (HUGGETT, 1980).

Para a determinação das frações molares de $O_{2,e}$, O_2 e CO , temos as equações 2.27, 2.28 e 2.29, respectivamente.

$$X_{O_2,e} = \frac{n_{O_2,e}}{n_{O_2,e} + n_{CO_2,e} + n_{CO,e} + n_{N_2}} \quad (2.27)$$

$$X_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{N_2}} \quad (2.28)$$

$$X_{CO} = \frac{n_{CO}}{n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{N_2}} \quad (2.29)$$

O subscrito “e” designa valores na entrada do calorímetro.

A depleção do O₂ é dada por:

$$\phi = \frac{n_{O_2,e} - n_{O_2}}{n_{O_2,e}} \quad (2.30)$$

A vazão de gases na exaustão $\dot{m} = C\sqrt{\Delta P/T_e}$ é determinada através da medida da variação da pressão (ΔP) em uma placa de orifício na saída do calorímetro e da temperatura de exaustão (T_e). A variação da pressão é medida em um manômetro de tubo em U e a temperatura de exaustão através de um termopar. Pode-se assim determinar a constante de calibração C cujo valor é da ordem de 5 kJ/s conforme a norma ASTM E 1354-03.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostra os resultados obtidos com as amostras de turfa coletadas. São apresentados os dados de classificação das amostras, de caracterização físico-química, análise termogravimétrica e queima em calorímetro cônico.

3.1 Classificação da turfa

A Tabela 3.1 mostra a classificação das amostras de turfa, incluindo as respectivas profundidades de cada amostra de turfa, coletadas no município de São José dos Campos.

Tabela 3.1 – Classificação das amostras de turfa.

Furo	Amostra	Profundidade (m)	Classificação
SJ-VL	A	0 - 0,6	Solo turfoso
SJ-1336	A1	0 - 0,5	Solo turfoso
	A2	0,9 - 1,1	Fibrosa
	A3	4,2 - 4,5	Fibrosa
	B	1,45	Fibrosa
	B1	0 - 0,5	Solo turfoso
	B2	0,5 - 0,7	Fibrosa
	B3	1,2 - 1,3	Fibrosa
	B5	3,15 - 3,35	fibrosa/hêmica
SJ-1338	C2	1,2 - 1,4	fibrosa/hêmica
	C3	2,3 - 2,7	fibrosa/hêmica
	D2	3,3 - 3,5	Fibrosa
	D4	6,2 - 6,4	fibrosa/hêmica

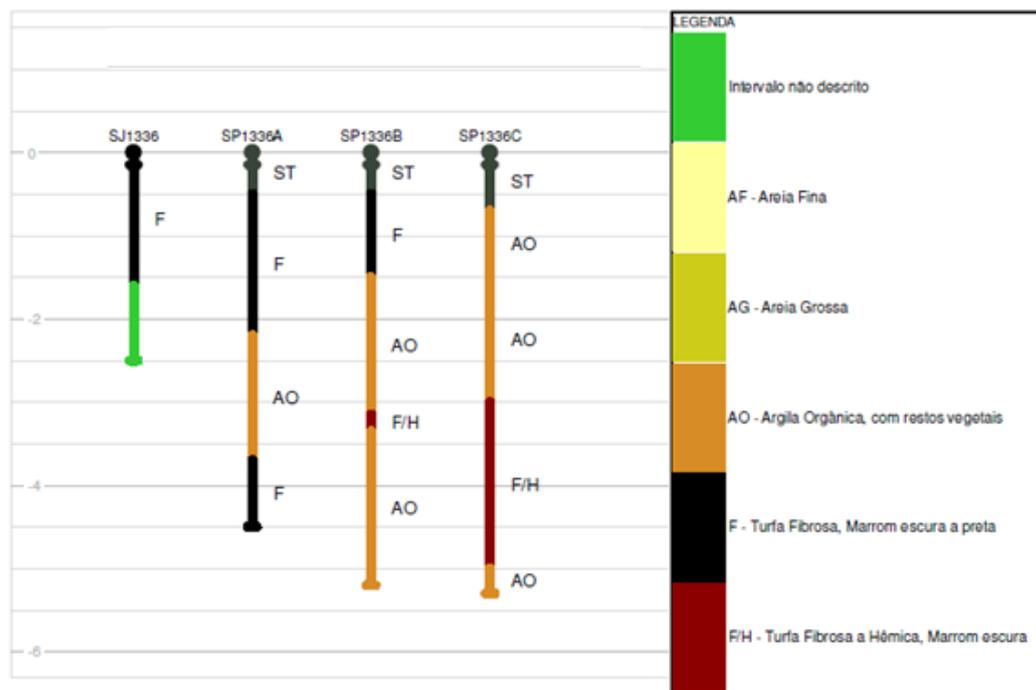
Fonte: Produção da autora e do Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015).

A Figura 3.1 mostra os perfis dos furos SJ-1336 obtidos pela CPRM, na década de 1980 (primeiro perfil à esquerda), e pela equipe do Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015) obtidos em 2017 (três perfis à direita, A, B e C).

A Figura 3.2 mostra os perfis dos furos SJ-1338 obtidos pela CPRM, na década de 1980 (primeiro perfil à esquerda), e pela equipe do Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015) obtidos em 2017 (quatro perfis à direita, A, B, C e D).

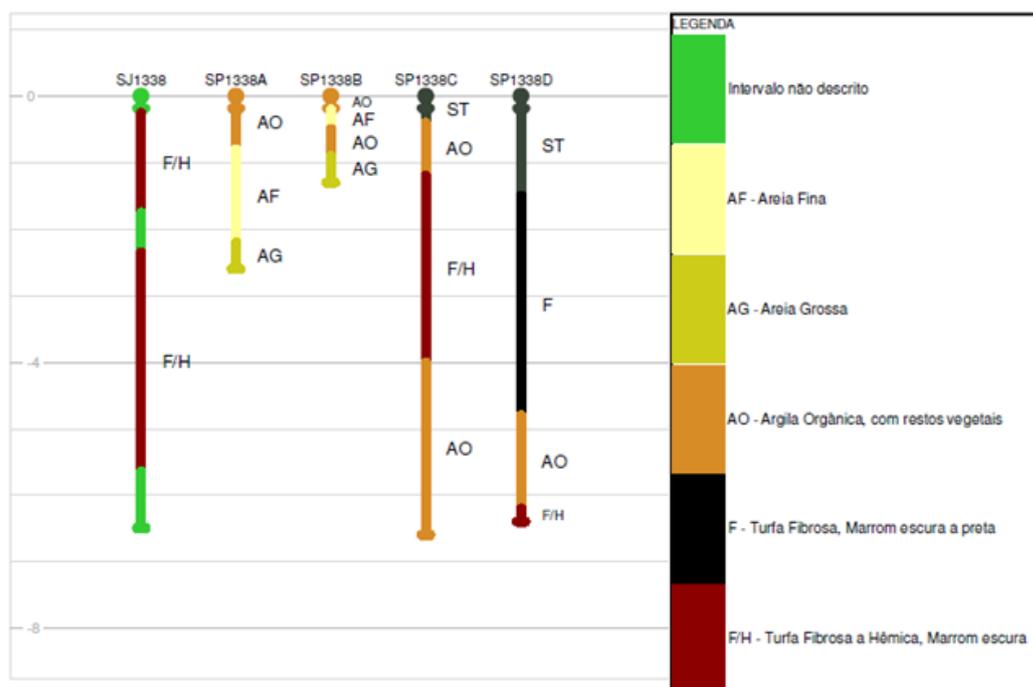
Os furos realizados em 2017 indicam que houve mudanças no solo ao longo desses anos, seja naturalmente ou forçada pelo homem, já que esta região está localizada dentro de um parque, no município de São José dos Campos.

Figura 3.1 – Perfil dos furos SJ-1336.



Fonte: Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015).

Figura 3.2 – Perfil do furo SJ-1338.



Fonte: Projeto FAPESP 2015/24201-0 (2015).

3.2 Características físico-químicas das amostras de turfa

3.2.1 Teor de umidade

A Tabela 3.2 mostra os teores de umidade calculados pelas normas ASTM D2974-87 método A e ABNT NBR16097.

Tabela 3.2 – Teores de umidade segundo normas ASTM D2974-87 método A e ABNT NBR16097.

	Amostra D2				Amostra D4			
	m_u (g)	m_s (g)	h (%)	w (%)	m_u (g)	m_s (g)	h (%)	w (%)
ASTM	50,1510	11,1386	77,79	350,25	50,0490	14,9262	70,18	235,31
NBR	5,0155	1,6171	67,76	210,15	5,0195	1,7357	65,42	189,19

Fonte: Produção da autora.

Pode-se observar na Tabela 3.2 a diferença nos resultados de teor de umidade entre os dois métodos utilizados. Ocorre uma diferença do

percentual da perda de massa entre os dois métodos, sendo mais elevado na norma ASTM. A utilização de uma temperatura mais elevada, como previsto na norma ASTM, pode ocasionar não somente a perda de água, mas também a perda de voláteis.

Por este motivo, determinou-se um procedimento para esse experimento, conforme descrito na metodologia, o qual foi denominado de procedimento INPE/TURFA com o aquecimento das amostras de turfa a 80 °C até estabilização da massa da amostra.

Utilizando o procedimento INPE/TURFA que prevê a secagem das amostras de turfa em 24 h, não se observou variação das massas das amostras até a segunda casa decimal (centésimo de grama) entre 24 e 30 horas após o início da secagem.

Segundo Abreu (1973), os teores de umidade da turfa em base úmida estão, em geral, entre 80 a 90%. Pode-se verificar neste trabalho que a amostra A é a que possui um maior teor de umidade, 90,78%, mesmo sendo uma amostra que se encontra na superfície do solo. Como descrito, essa amostra foi retirada na época de chuva, por isso o teor de umidade medido é maior.

Para as outras amostras, retiradas em uma época do ano mais seca (julho de 2016), houve uma variação de teor de umidade entre 65 e 88 %. Nota-se que as amostras mais superficiais, em geral, apresentam teores de umidade menores

A Tabela 3.3 mostra o teor de umidade em base seca e base úmida das amostras de turfa com o uso do procedimento de secagem INPE/TURFA.

Tabela 3.3 – Teores de umidade em base seca e base úmida, com secagem a 80 °C por 24 h, com procedimento de secagem INPE/TURFA.

Amostra	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Teor de umidade	
			<i>h</i> (%)	<i>w</i> (%)
A	19,63	1,8094	90,78	984,89
A1	21,7264	6,2051	71,44	250,14
A2	10,771	1,2237	88,64	780,20
A3	20,718	3,4935	83,14	493,04
B	21,3985	3,3394	84,39	540,79
B1	22,2902	6,4875	70,90	243,59
B2	10,6576	1,8500	82,64	476,09
B3	22,0876	3,2132	85,45	587,40
B5	10,2966	2,3019	77,64	347,31
C2	20,9337	6,4396	69,24	225,08
C3	20,6866	7,2212	65,09	186,47
D2	20,5015	2,6959	86,85	660,47
D4	10,1203	2,8954	71,39	249,53

Fonte: Produção da autora.

3.2.2 Massa específica

MASSA ESPECÍFICA APARENTE

A Tabela 3.4 mostra os volumes e as massas medidas das amostras de turfa e as respectivas massas específicas aparentes. As amostras secas foram armazenadas em plástico *zip lock* após determinação das massas secas pelo procedimento TURFA/INPE.

Tabela 3.4 – Determinação da massa específica aparente das amostras de turfa.

Amostra	Volume (cm ³)	Massa (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)
A	3,0	0,8922	0,2974
A1	3,2	2,1810	0,6816
A2	4,2	2,1183	0,5044
A3	2,4	1,5013	0,6255
B	2,4	0,9669	0,4029
B1	3,2	1,9262	0,6019
B2	3,4	1,9564	0,5754
B3	3,8	2,0454	0,5383
B5	3,6	2,1223	0,5895
C2	3,6	2,1823	0,6062
C3	4,2	2,5340	0,6033
D2	4,8	2,8668	0,5973
D4	3,0	1,6191	0,5397

Fonte: Produção da autora.

As massas específicas aparentes medidas variaram de 0,2974 a 0,6816 g/cm³, dentro da faixa de 0,30 a 0,8 g/cm³ mencionada por Silva et al. (1987).

MASSA ESPECÍFICA DA FASE SÓLIDA

A Tabela 3.5 mostra os valores de massa específica da fase sólida das amostras de turfa determinadas pelo picnômetro a gás e seus erros associados, dados pelo equipamento.

A massa específica da fase sólida da amostra apresentou valores entre 1,456 a 2,423 g/cm³. Observa-se que as amostras de solo turfoso apresentaram valores menores de massa específica da fase sólida (amostras A, A1 e B1), em torno de 1,5 g/cm³, enquanto as amostras fibrosa/hêmica apresentaram valores mais elevados desse parâmetro (amostras B5, C2, C3 e D4), cerca de 2 g/cm³.

Tabela 3.5 – Massa específica da fase sólida das amostras de turfa.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)
A	1,4560 ± 0,0008
A1	1,6298 ± 0,0006
A2	1,4883 ± 0,0015
A3	1,7804 ± 0,0010
B	1,4515 ± 0,0029
B1	1,5902 ± 0,0012
B2	2,2245 ± 0,0009
B3	1,9780 ± 0,0019
B5	2,4226 ± 0,0056
C2	2,0330 ± 0,0009
C3	2,0267 ± 0,0003
D2	1,5893 ± 0,0016
D4	1,6116 ± 0,0008

Fonte: Produção da autora.

3.2.3 Poder calorífico da turfa

A Tabela 3.6 mostra os valores de poder calorífico superior (PCS) determinados por calorímetro, além da porcentagem de resíduo da combustão e do material queimado.

Segundo Abreu (1973) os valores de PCS para a turfa variam entre 10500 e 17000 J/g. Neste trabalho, a turfa classificada como fibrosa e o solo turfoso apresentaram valores nesta faixa classificada na literatura como turfa. As amostras de turfa fibrosa/hêmica, no entanto, apresentaram valores bem abaixo destes, variando entre 5958 e 7537 J/g, devido aos altos teores de material inorgânico.

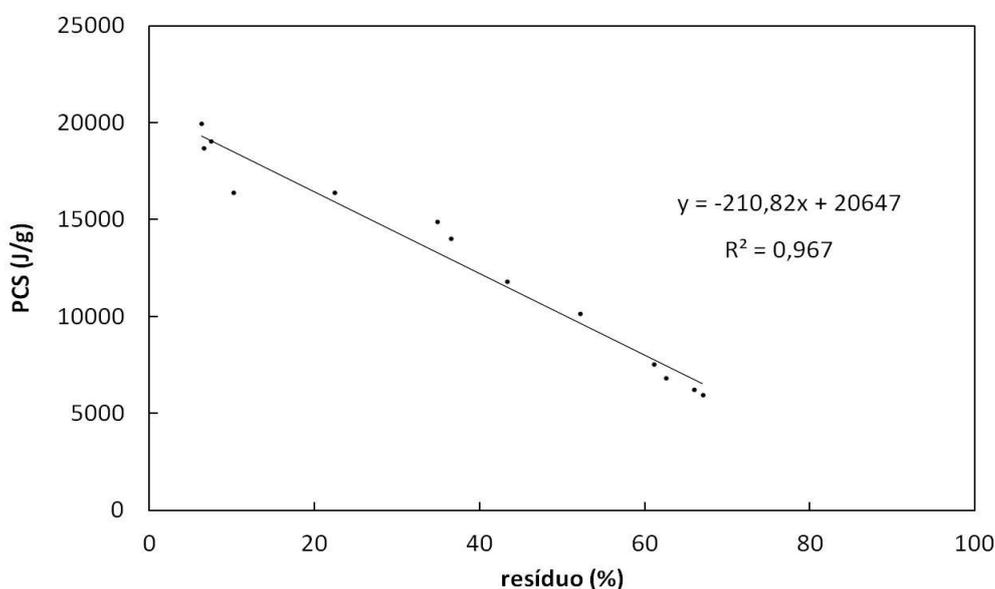
A Figura 3.3 mostra os valores de PCS versus o resíduo (teor de cinzas) das amostras de turfa analisadas.

Tabela 3.6 – Valores de PCS para as amostras de turfa.

Amostra	PCS (J/g)	% de resíduo	% de material queimado
A	19944 ± 375	6,32	93,68
A1	14048 ± 169	36,53	63,47
A2	16408 ± 125	10,14	89,86
A3	11804 ± 62	43,32	56,68
B	18690 ± 184	6,57	93,43
B1	16408 ± 129	22,37	77,63
B2	19071 ± 80	7,45	92,55
B3	14919 ± 335	34,81	65,19
B5	6826 ± 274	62,52	37,48
C2	5958 ± 51	67,02	32,98
C3	6252 ± 35	65,93	34,07
D2	10134 ± 266	52,16	47,84
D4	7537 ± 257	61,14	38,86

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.3 – PCS versus resíduo das amostras de turfa.



Fonte: Produção da autora.

O resíduo da amostra representa o material inorgânico não queimado durante a análise. Pode-se observar na Figura 3.3 uma boa correlação

($R^2 = 0,967$) entre o valor do PCS e o resíduo, indicando que o valor do PCS varia em função do teor de matéria orgânica disponível na amostra (material queimado). Assim, a amostra que possui um maior teor de matéria orgânica disponível em sua composição, apresenta maior valor de PCS.

O valor do PCS está diretamente relacionado com o poder de queima do material, ou seja, quanto maior o valor do PCS, maior é a energia liberada por este combustível.

Visto que um dos objetivos deste trabalho é a verificação das possibilidades de perigo de incêndio em áreas turfosas, ao se verificar os valores obtidos experimentalmente com o PCS, conclui-se que o “solo turfoso” e a “turfa fibrosa” possuem maior probabilidade de iniciar e manter um incêndio nos locais onde estes foram encontrados, levando-se em consideração a área e a profundidade deste material na região em que foi encontrada.

3.3 Análise elementar da turfa

Para a realização deste experimento, foram usadas três amostras de solo turfoso, duas amostras de turfa fibrosa e uma amostra de turfa fibrosa/hêmica, como mostra a Tabela 3.7. Essas amostras foram escolhidas levando em consideração os elevados valores de PCS e a classificação das amostras de turfa.

A Tabela 3.8 mostra as percentagens de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre das amostras analisadas. Notar que a soma em cada caso não dá 100 % porque não foram contabilizados os teores de oxigênio e de resíduos.

Pode-se verificar que as amostras de solo turfoso e de turfa fibrosa apresentam os maiores valores de carbono, apresentando assim, maiores teores de hidrocarboneto em sua composição. As quantidades de hidrogênio, nitrogênio e enxofre são relativamente baixas, em comparação ao carbono, para todas as amostras analisadas.

Tabela 3.7 – Amostras para análise CHNS das amostras de turfa.

Amostra	Profundidade(m)	Classificação	PCS (J/g)
A	0 – 0,6	Solo turfoso	19944
A1	0 - 0,5	solo turfoso	14048
B	0,7 - 1,45	fibrosa	18690
B1	0 - 0,5	solo turfoso	16408
B2	0,5 - 0,7	fibrosa	19071
B5	3,15 - 3,35	fibrosa/hêmica	6826

Fonte: Produção da autora.

Tabela 3.8 – Percentagem de C, H, N e S para as amostras de turfa.

Amostra	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Enxofre (%)
A	61,25	7,58	2,05	1,43
A1	41,36	5,57	1,44	1,06
B	47,08	6,02	1,54	1,08
B1	44,77	5,18	1,08	0,96
B2	49,07	5,03	1,45	0,8
B5	15,62	2,43	0,2	0,49

Fonte: Produção da autora.

3.4 Análise termogravimétrica

Foram escolhidas duas amostras de solo turfoso, duas amostras de turfa fibrosa e uma amostra de turfa fibrosa/hêmica para a análise termogravimétrica. Levaram-se em consideração os valores elevados do PCS e a disponibilidade de material em quantidade suficiente para a realização dos testes e para demais análises de queima. As amostras escolhidas são apresentadas na Tabela 3.9.

Como já mencionado, um dos objetivos do trabalho é verificar as características da turfa que possam causar riscos de incêndio *in loco*, então foi realizada a análise termogravimétrica destas amostras de turfa fibrosa e de solo turfoso, pois são os tipos de turfa de interesse neste trabalho. Para efeitos de comparação, foi realizada a análise termogravimétrica de uma amostra de turfa fibrosa/hêmica.

Tabela 3.9 – Amostras para análise termogravimétrica.

Amostra	Profundidade(m)	Classificação	Massa específica (g/cm³)	PCS (J/g)
A1	0 - 0,5	solo turfoso	1,6298	14048
B	0,7 - 1,45	fibrosa	1,4515	18690
B1	0 - 0,5	solo turfoso	1,5902	16408
B2	0,5 - 0,7	fibrosa	2,2245	19071
B5	3,15 - 3,35	fibrosa/hêmica	2,4226	6826

Fonte: Produção da autora.

Nesta análise, as amostras de turfa foram aquecidas de 35 a 800 °C, com uma taxa de aquecimento em geral de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min (YANG 2015), utilizando como gases nos testes o nitrogênio e oxigênio, ou seja, uma atmosfera em ar. A taxa de varredura utilizada foi de 70 mL/min para todos os experimentos (determinada em conjunto com técnico da área). Em todas as análises, foram utilizados em média 5 mg de amostra (orientação do fabricante do equipamento, por ser um material inflamável). Os gráficos foram gerados pelo software TA Instruments Universal Analysis 2000.

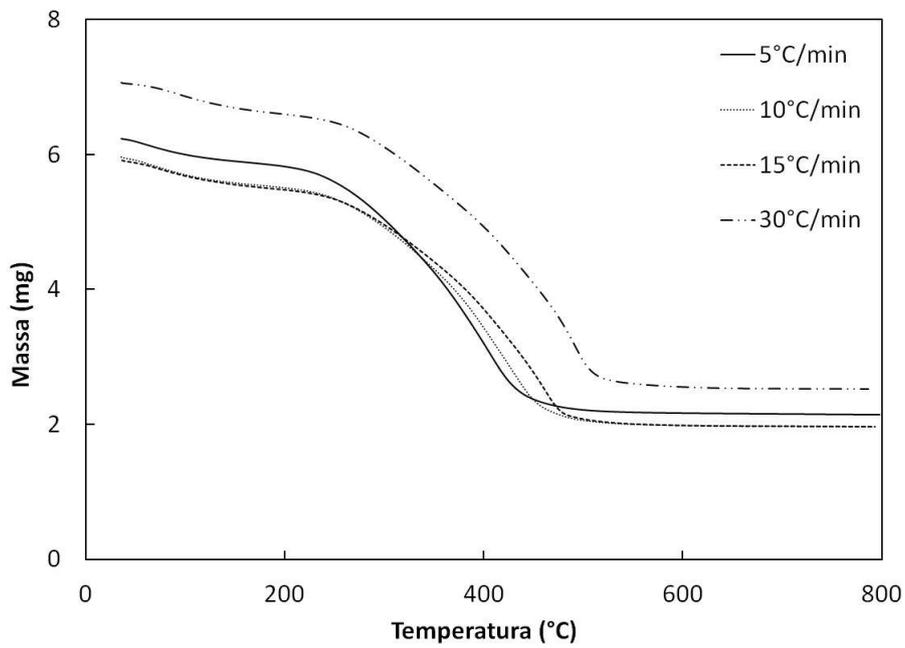
AMOSTRA A1 (SOLO TURFOSO)

A Figura 3.4 apresenta a massa instantânea durante a análise termogravimétrica (TGA) para a amostra A1 (solo turfoso), mostrando a perda de massa em função da temperatura para as taxas de aquecimento de 5, 10, 15 e 30 °C/min, enquanto a Figura 3.5 apresenta o gráfico da normalização destas massas versus a temperatura de aquecimento.

A variação de massa da amostra A1, de solo turfoso, para taxas de aquecimento menores, por exemplo, para 5 °C/min, durante a fase de pirólise, é maior que para taxas de aquecimento maiores, mantendo-se fixa a temperatura, como mostra a Figura 3.5. Isso provavelmente decorre do maior tempo de aquecimento na câmara de combustão, havendo maior perda de massa da amostra. Este comportamento implica ainda

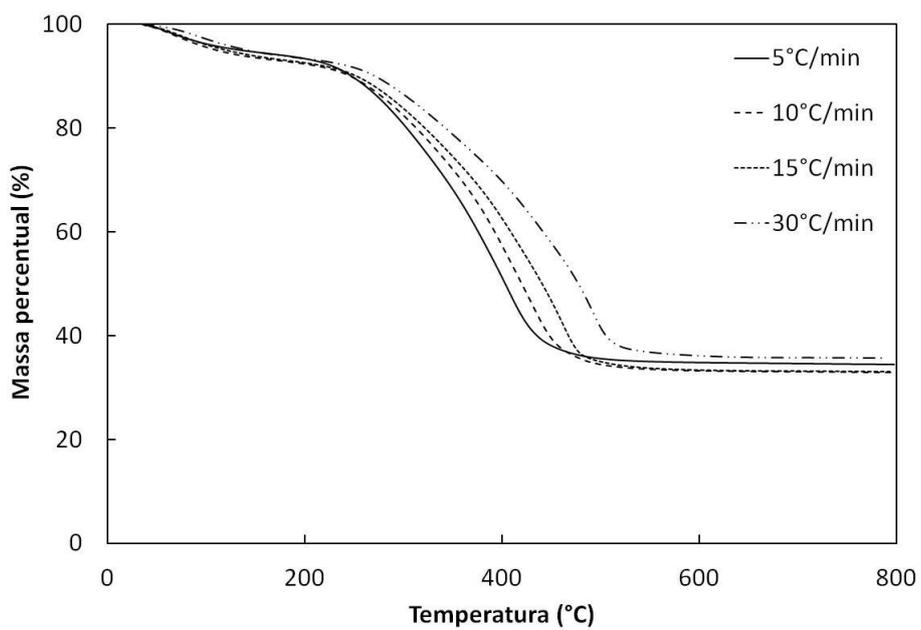
que a estabilização da massa para aquecimento 5 °C/min ocorra em temperatura menor que nas taxas de aquecimento de 10, 15 e 30 °C/min.

Figura 3.4 – Massa instantânea da amostra A1 (solo turfoso).



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.5 – Massa normalizada da amostra A1 (solo turfoso).



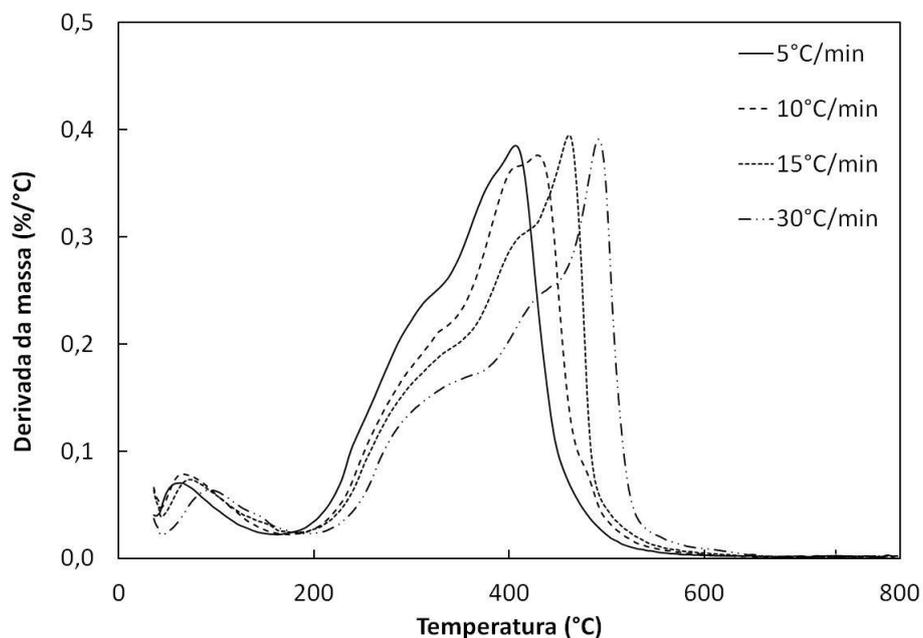
Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.6 mostra a derivada percentual da massa instantânea, com base na massa inicial, $(dm/dT)/m_0$ ($\%/^{\circ}\text{C} \times 100$), denominada DTA, para a amostra A1 (solo turfoso), nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15 e 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em função da temperatura.

A Figura 3.7 mostra a derivada percentual da massa, com base na massa instantânea, $(dm/dT)/m$ ($\%/^{\circ}\text{C} \times 100$) versus a temperatura da amostra A1 (solo turfoso) nas taxas de aquecimento determinadas.

Na Figura 3.7, em conformidade com resultados apresentados na Figura 3.16, verifica-se que o pico de perda de massa da amostra ocorre antes, ou seja, em temperaturas menores para as menores taxas de aquecimento da amostra sucessivamente. Assim, por exemplo, este pico ocorre em torno de 400 $^{\circ}\text{C}$ para 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, enquanto que para 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ocorre em torno de 500 $^{\circ}\text{C}$. Nota-se a existência de picos isolados para aquecimentos de 5, 10, 15 e 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

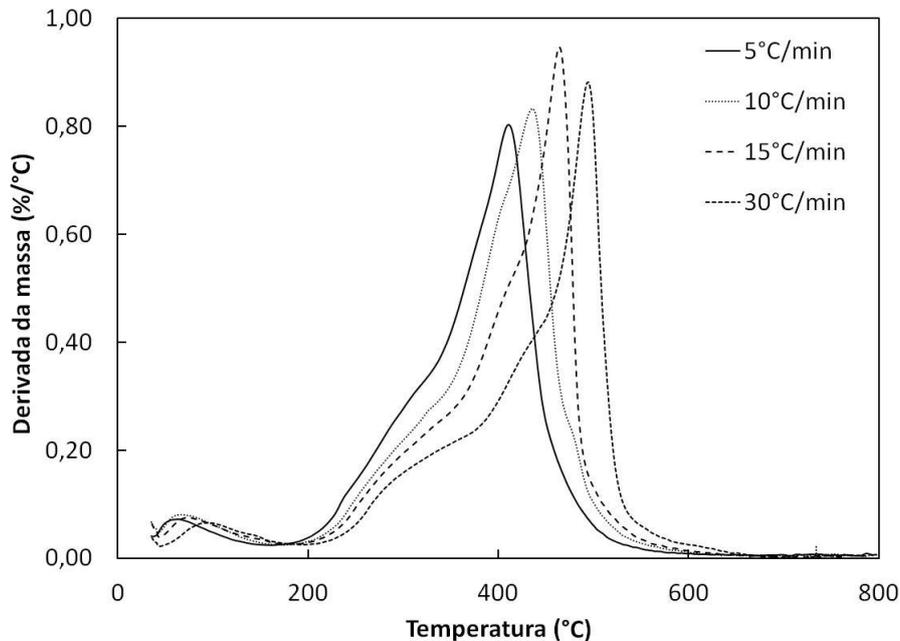
Figura 3.6 – Derivada percentual da massa da amostra A1 (solo turfoso), com base na massa inicial.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.8 mostra a troca térmica na amostra A1 (solo turfoso) durante a calorimetria exploratória diferencial (DSC) para diferentes taxas de aquecimento, em função da temperatura.

Figura 3.7 – Derivada percentual da massa da amostra A1 (solo turfoso), com base na massa instantânea.



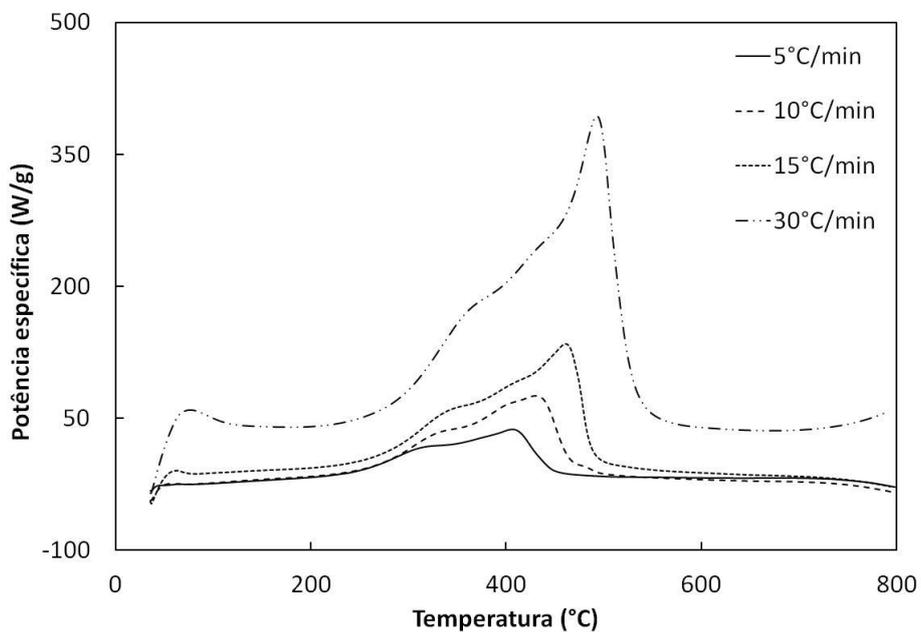
Fonte: Produção da autora.

Pela Figura 3.8, verifica-se que a absorção/liberação de calor para taxas menores de aquecimento (5 °C/min) são mais suavizadas, indicando que provavelmente, a secagem, pirólise e combustão se desenvolvam de forma mais lenta, sendo que estas curvas vão se tornando cada vez menos suavizadas à medida que se aumenta a taxa de aquecimento. Verifica-se ainda a coerência dos picos de liberação de calor e os de perda de massa que relativamente coincidem.

As Figuras 3.4 a 3.8 mostram que as amostras passam por três fases principais durante o aquecimento contínuo no Analisador Térmico Simultâneo: a secagem a partir de 100 °C, pirólise sem chama e pirólise com chama (combustão), entre 200 a 500 °C, e, possivelmente, incandescência, acima de 500 °C. A fase inicial do processo é endotérmica, incluindo a secagem da amostra, com a evaporação de

água residual, e pirólise, com liberação dos voláteis leves. Quando a liberação de voláteis aumenta, com liberação de voláteis mais pesados, gerando uma mistura com o ar em condições próximas à estequiometria, se as temperaturas estiverem acima dos valores de ignição, ocorre a pirólise com chama, ou seja, a combustão dos voláteis. Finalizada a liberação de voláteis o oxigênio do ar difunde-se até a superfície e poros do carbono residual, produzindo uma queima lenta, ou seja, o processo de incandescência (smoldering).

Figura 3.8 – Troca térmica na amostra A1 (solo turfoso).



Fonte: Produção da autora.

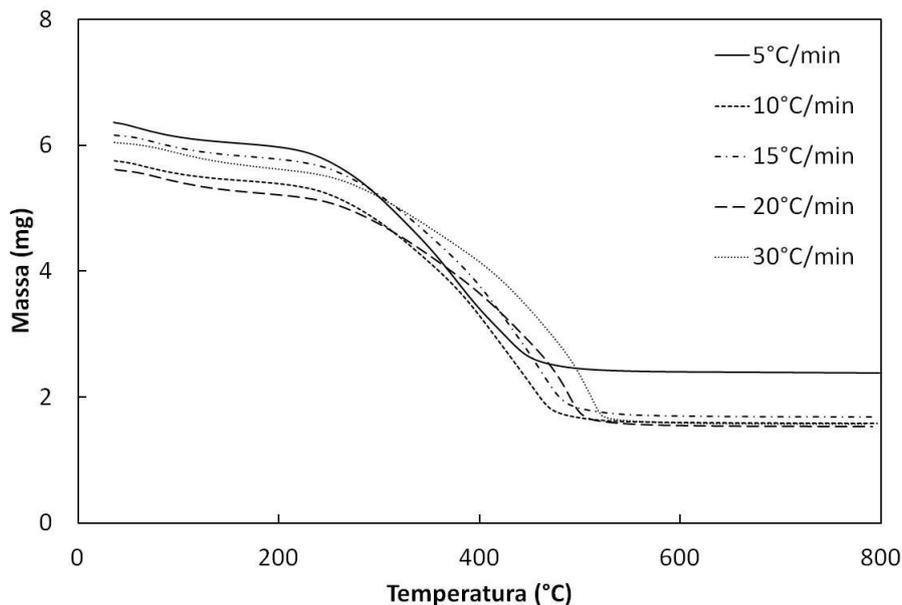
AMOSTRA B1 (SOLO TURFOSO)

A Figura 3.9 apresenta a massa instantânea durante análise termogravimétrica (TGA) para a amostra B1, também de solo turfoso, nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min em função da temperatura, enquanto a Figura 3.10 mostra o gráfico da massa normalizada da amostra B1 versus a temperatura de aquecimento das amostras.

A Figura 3.11 apresenta a derivada percentual da massa (DTA), com base na massa inicial, para a amostra B1 (solo turfoso) em todas as taxas de aquecimento estudadas. A Figura 3.12 mostra a derivada percentual da massa, com base na massa instantânea, versus a temperatura da amostra B1 (solo turfoso).

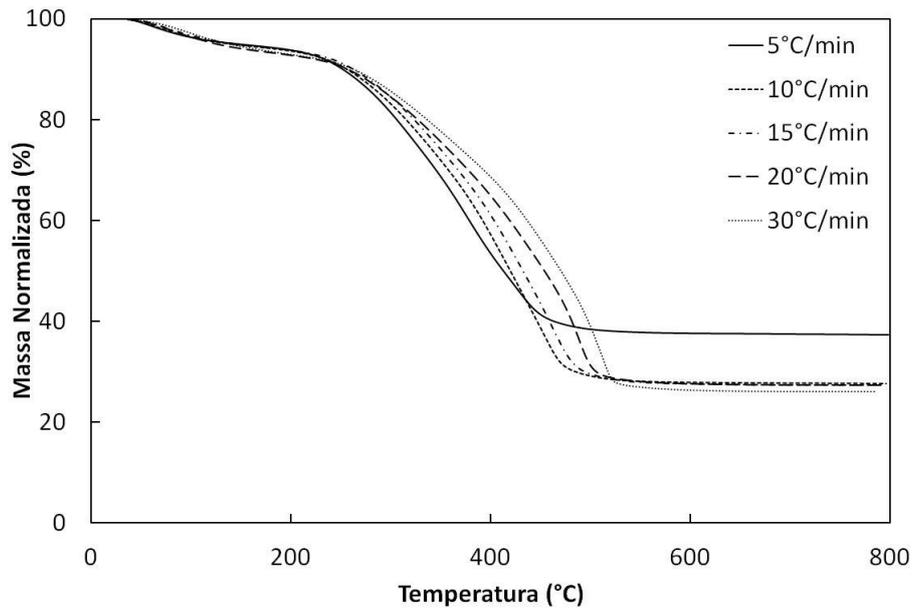
A análise da perda de massa para a amostra B1 é semelhante à da amostra A1, lembrando que ambas são amostras de solo turfoso. A média do teor de material não queimado para as cinco taxas de aquecimento da amostra B1 é de 29,1%, enquanto que da A1 é de 33,4% em relação à massa inicial da amostra que, por sua vez, retém uma pequena quantidade de água. Verifica-se que a amostra A1 possui PCS de 14239 J/g, enquanto a B1 possui 16408 J/g (Tabela 3.9), indicando maior teor de carbono na amostra B1 (ver Tabela 3.8), o que propicia a oxidação desta em CO₂, e conseqüentemente, menor teor de material não queimado, o qual é constituído principalmente de material inorgânico, condizendo com o esperado.

Figura 3.9 – Massa instantânea da amostra B1 (solo turfoso).



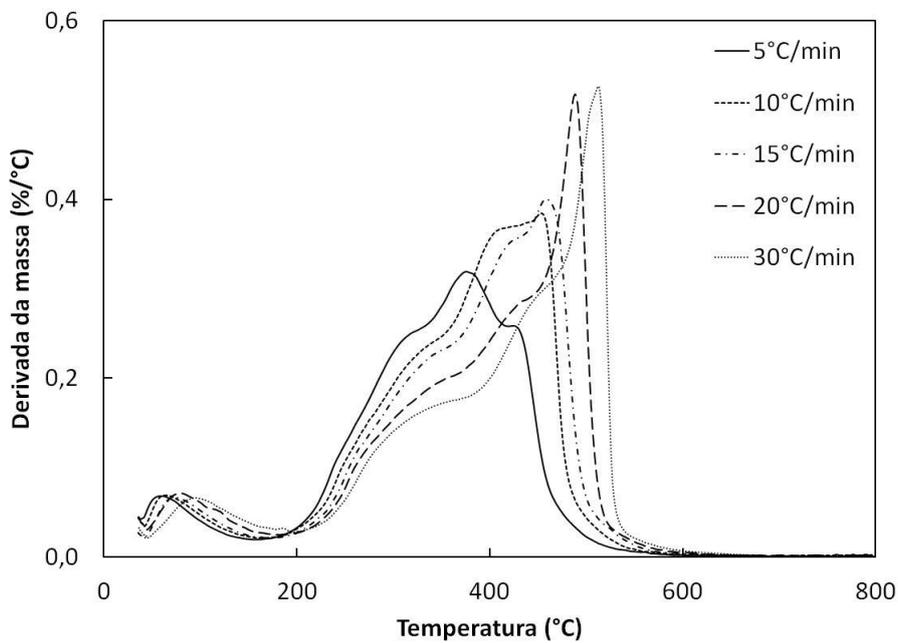
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.10 – Massa normalizada da amostra B1 (solo turfoso).



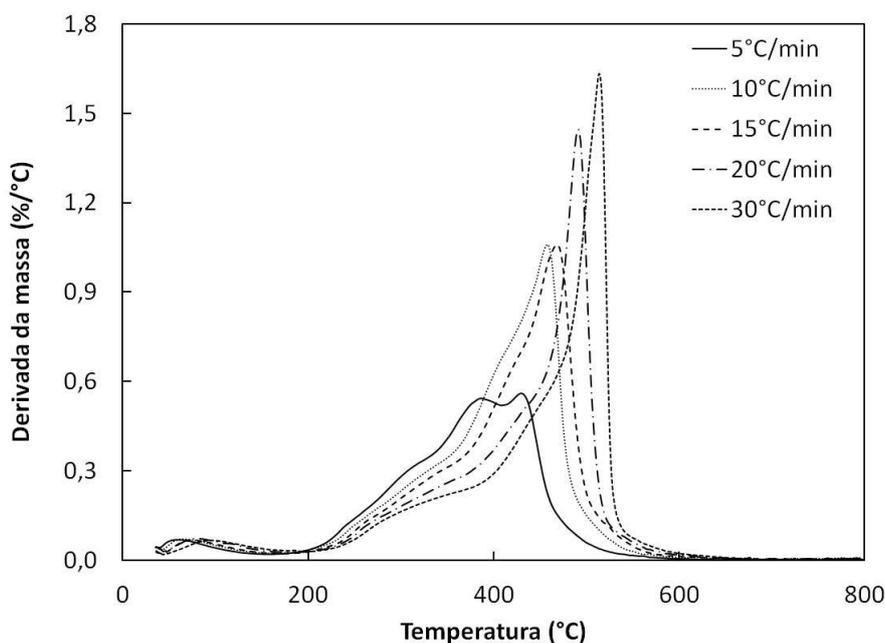
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.11 – Derivada da massa da amostra B1 (solo turfoso) com base na massa inicial.



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.12 – Derivada da massa da amostra B1 (solo turfoso) com base na massa instantânea.



Fonte: Produção da autora.

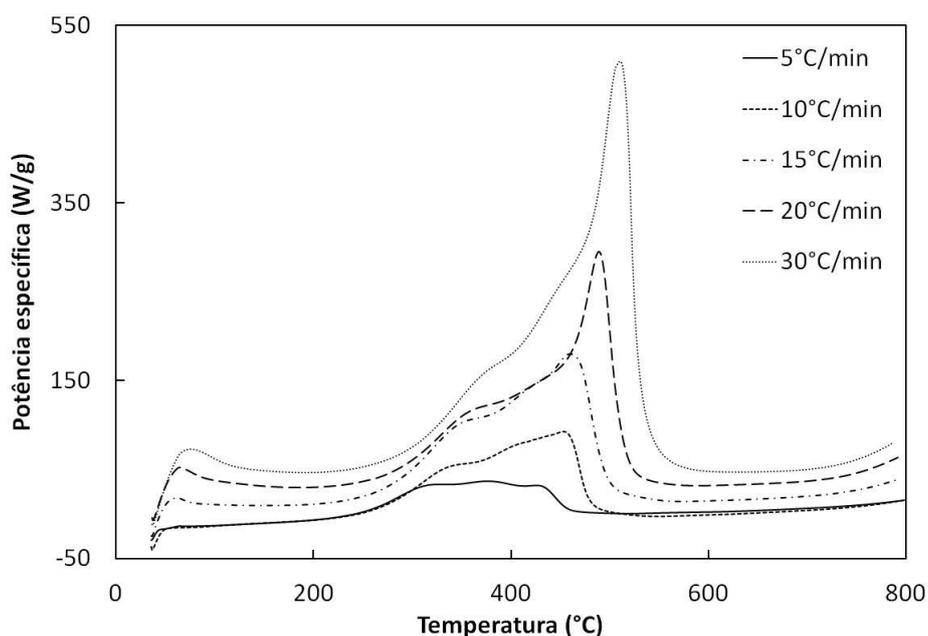
Assim como para a amostra A1, o pico de perda de massa para a amostra B1 é observado em temperaturas menores para menores taxas de aquecimento.

A Figura 3.13 apresenta a troca térmica durante a calorimetria exploratória diferencial (DSC) para a amostra B1 (solo turfoso) nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min.

A análise da troca térmica para a amostra B1 é análoga à amostra A1, pois as curvas de potência específica em taxas de aquecimento menores são mais suavizadas, indicando que as reações químicas que estão ocorrendo durante o processo ocorrem mais lentamente em taxas de aquecimento mais baixas.

As amostras de turfa A1 e B1 tiveram o mesmo comportamento durante a análise termogravimétrica, o que se mostra coerente, pois são duas amostras do mesmo tipo de turfa, que neste caso é o solo turfoso.

Figura 3.13 – Troca térmica na amostra B1 (solo turfoso).



Fonte: Produção da autora.

AMOSTRA B (TURFA FIBROSA)

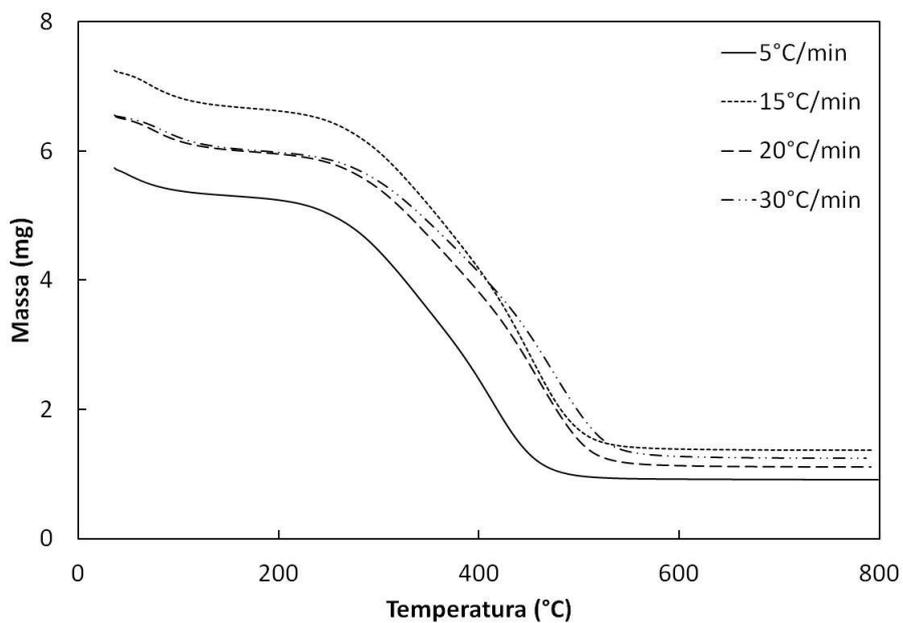
A Figura 3.14 mostra a massa instantânea durante a análise termogravimétrica (TGA) nas taxas de aquecimento de 5, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B, amostra de turfa fibrosa.

A Figura 3.15 mostra a massa normalizada durante a análise termogravimétrica (TGA) nas taxas de aquecimento de 5, 15, 20 e 30 °C/min versus a temperatura para a amostra B (turfa fibrosa).

A Figura 3.16 mostra a derivada da massa com base na massa inicial (DTA) nas taxas de aquecimento de 5, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B (turfa fibrosa). A Figura 3.17 mostra a derivada da massa instantânea com base na massa instantânea versus a temperatura da amostra B (turfa fibrosa).

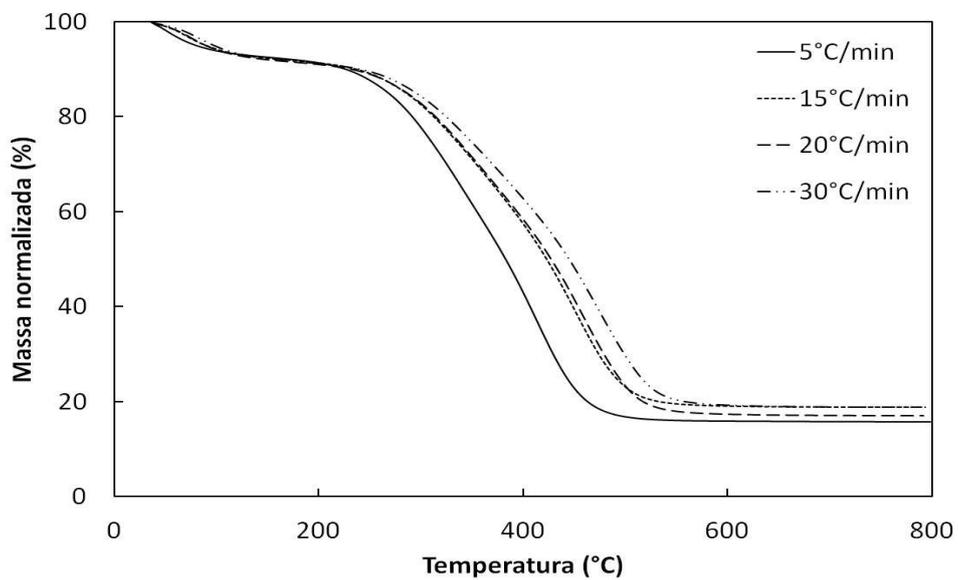
Pode-se verificar para a amostra de turfa B, em média, 18% de material não queimado.

Figura 3.14 – Massa instantânea da amostra B (turfa fibrosa).



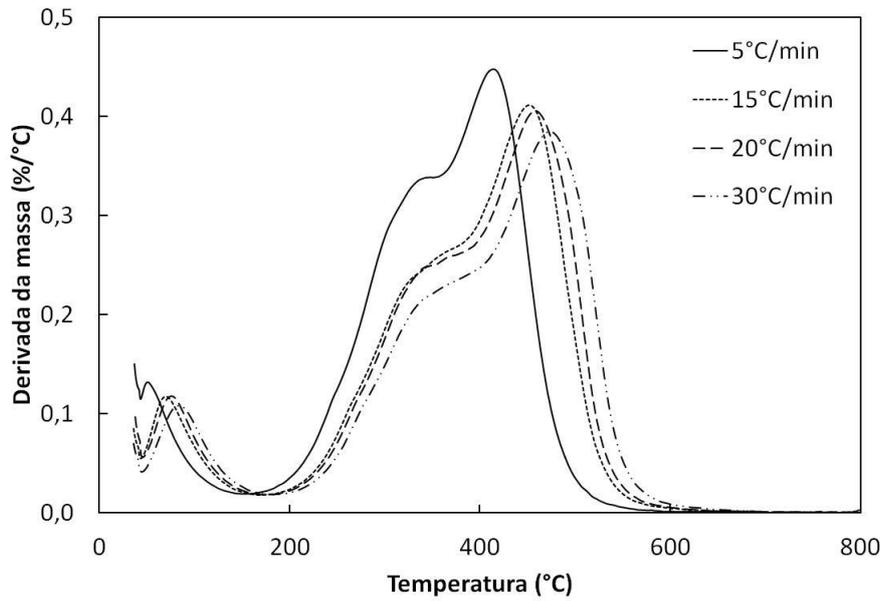
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.15 – Massa normalizada da amostra B (turfa fibrosa).



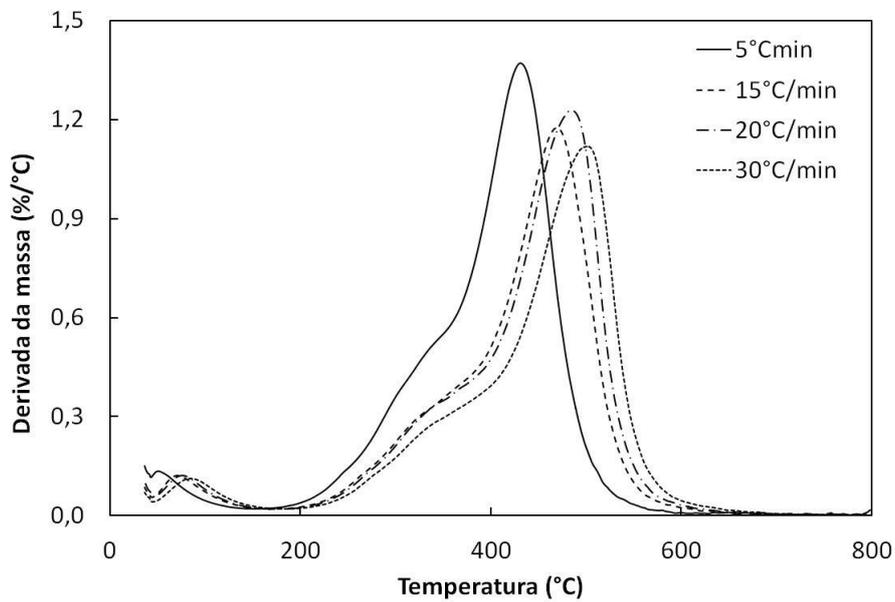
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.16 – Derivada da massa da amostra B (turfa fibrosa) com base na massa inicial.



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.17 – Derivada da massa da amostra B (turfa fibrosa) com base na massa instantânea.



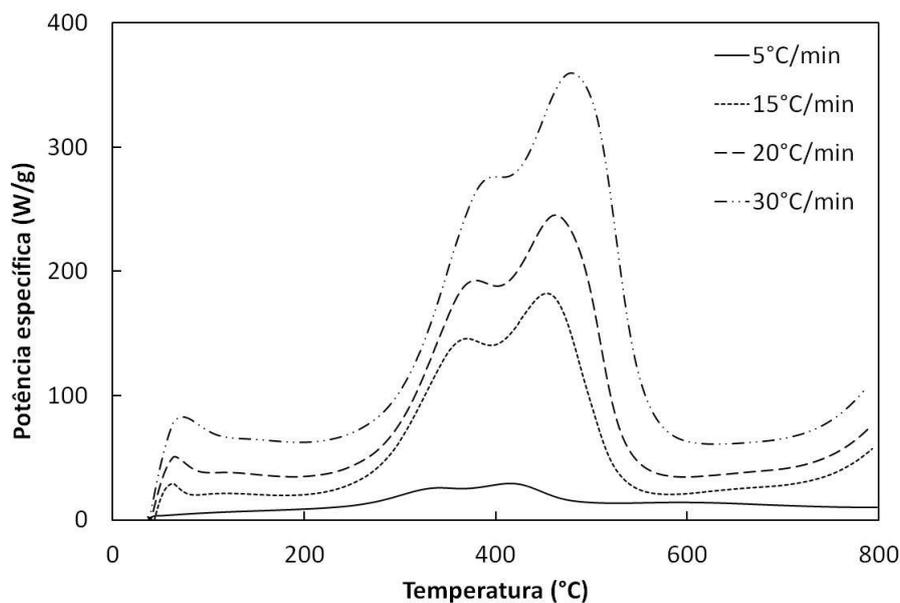
Fonte: Produção da autora.

Assim como as amostras anteriormente analisadas, a amostra de turfa B apresentou um pico de perda de massa próximo dos 100 °C, que pode ser atribuído à perda de água, além do pico na faixa dos 400 °C para a taxa de aquecimento de 5 °C/min e de 500 °C para a taxa de aquecimento de 30 °C/min.

A Figura 3.18 mostra a troca térmica durante a calorimetria exploratória diferencial (DSC) nas taxas de aquecimento estudadas para a amostra B (turfa fibrosa).

A análise da troca térmica para a amostra B é semelhante às anteriores, pois a uma taxa de aquecimento mais baixa, houve a suavização da curva.

Figura 3.18 – Troca térmica na amostra B (turfa fibrosa).



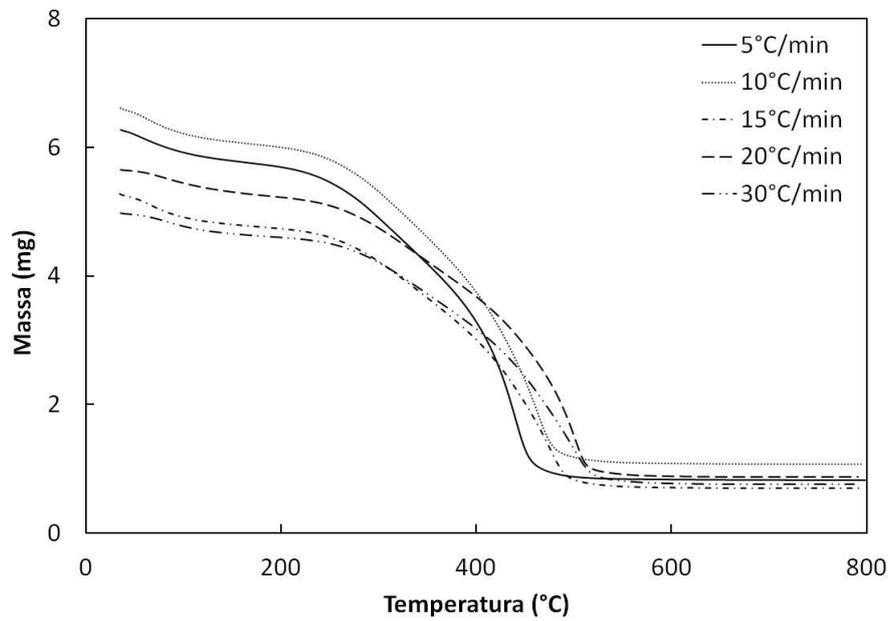
Fonte: Produção da autora.

AMOSTRA B2 (TURFA FIBROSA)

A Figura 3.19 mostra a massa instantânea durante a análise termogravimétrica (TGA) nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B2 (turfa fibrosa), enquanto a Figura 3.20 mostra a

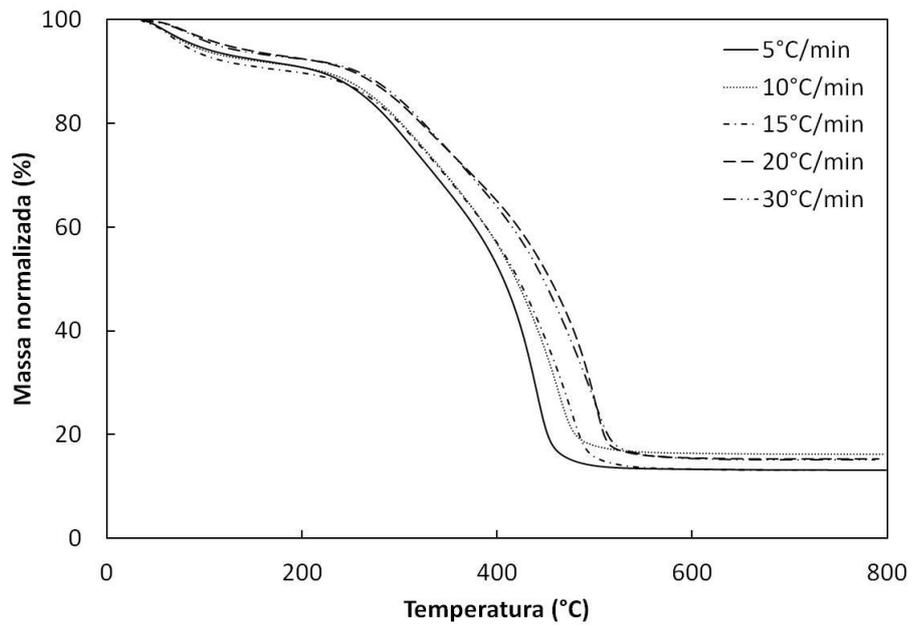
massa normalizada durante a análise termogravimétrica (TGA) versus a temperatura para a mesma amostra.

Figura 3.19 – Massa instantânea da amostra B2 (turfa fibrosa).



Fonte: Produção da autora.

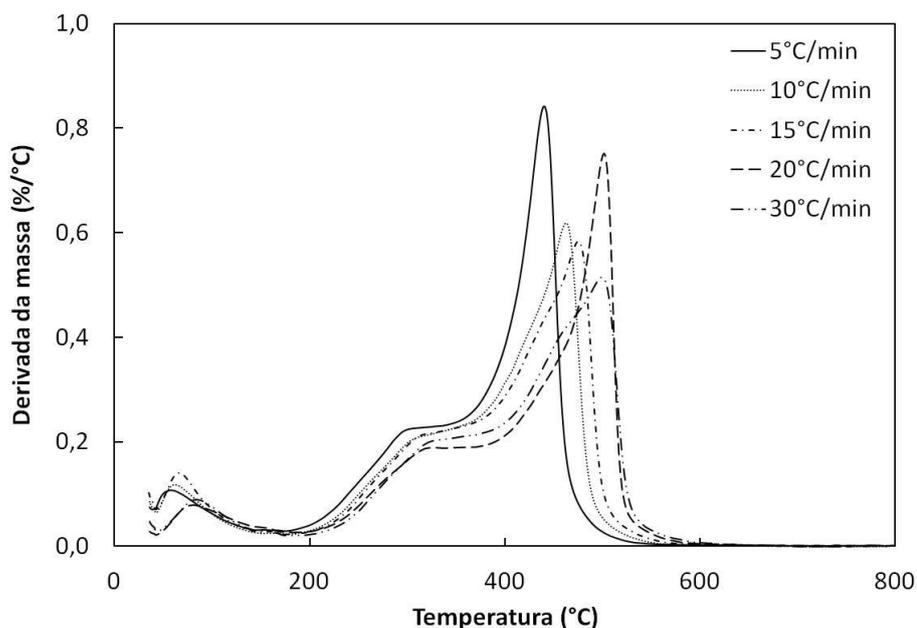
Figura 3.20 – Massa normalizada da amostra B2 (turfa fibrosa).



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.21 mostra a derivada da massa instantânea (DTA), com base na massa inicial, para a amostra B2 (turfa fibrosa), nas taxas de aquecimento utilizadas para esta análise térmica. A figura 3.22 mostra a derivada da massa instantânea com base na massa instantânea versus a temperatura da amostra B2(turfa fibrosa).

Figura 3.21 – Derivada da massa da amostra B2 (turfa fibrosa) com base na massa inicial.

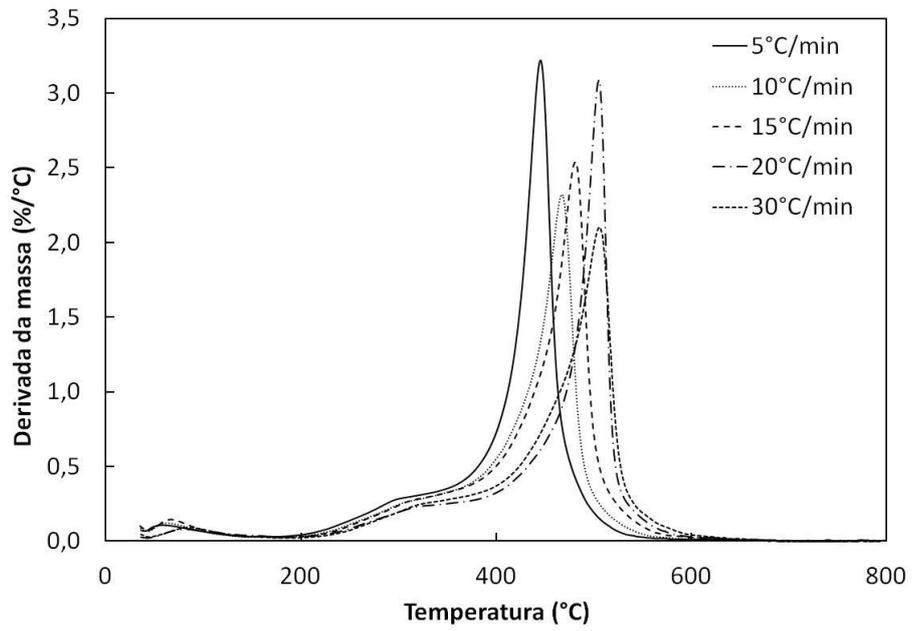


Fonte: Produção da autora.

A amostra B apresentou um teor de 17,5% de material não queimado (enquanto a B2 possui 14,9%), o que condiz com a análise do valor do PCS, pois a amostra B2 apresenta um valor de PCS de 19071 J/g, enquanto para a amostra B foi determinado um valor de 18690 J/g. Desta forma, verifica-se que provavelmente a amostra B2 possui um teor de carbono um pouco mais elevado que a amostra B. A amostra B2, assim como as outras amostras analisadas, apresentou um pico de perda de massa entre 400 e 500 °C.

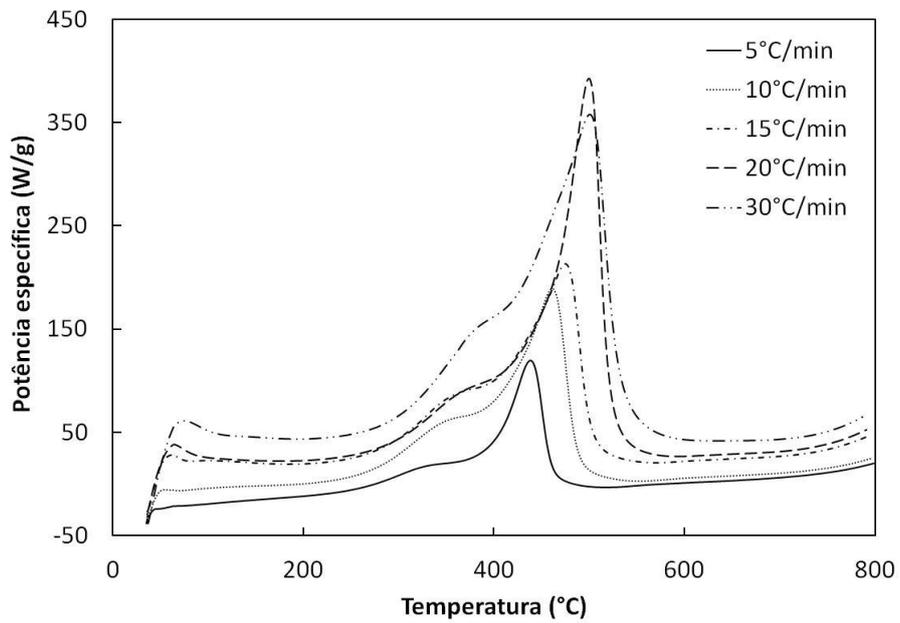
A Figura 3.23 mostra a troca térmica durante a calorimetria exploratória diferencial (DSC) nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B2 (solo turfoso).

Figura 3.22 – Derivada da massa da amostra B2 (turfa fibrosa) com base na massa instantânea.



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.23 – Troca térmica na amostra B2 (turfa fibrosa).



Fonte: Produção da autora.

A amostra B2, apresentou um pico mais acentuado na faixa de temperatura entre 400 e 500 °C do que as outras amostras analisadas. Essa diferença pode ser atribuída a uma perda de massa da amostra mais acentuada, visto que esta possui maior PCS, se comparado às demais amostras, ver Tabela 3.9, e portanto, maior troca térmica liberada para estas temperaturas.

AMOSTRA B5 (TURFA FIBROSA/HÊMICA)

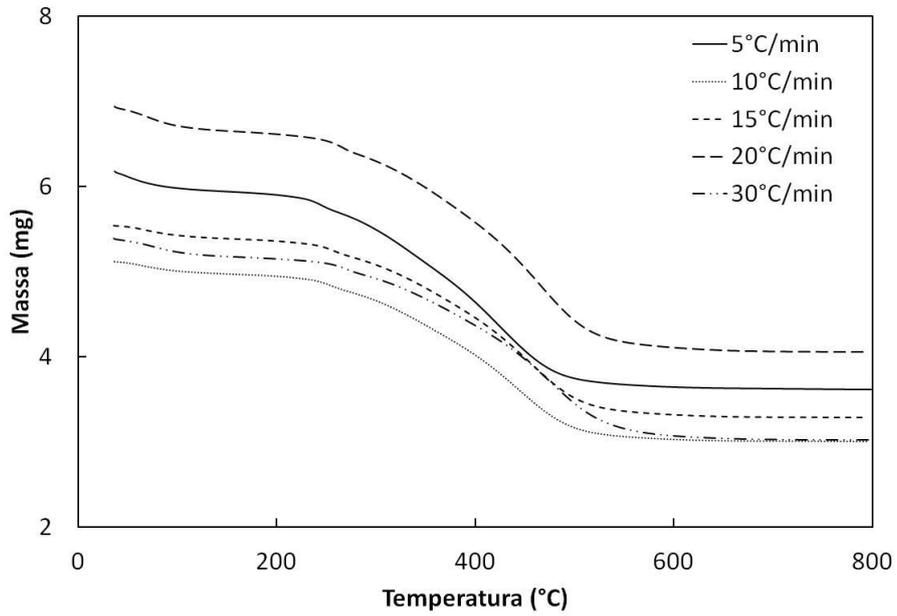
A Figura 3.24 mostra a massa instantânea durante a análise termogravimétrica (TGA) da amostra B5 nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min, enquanto a Figura 3.25 mostra a massa normalizada versus a temperatura.

A Figura 3.26 mostra a derivada percentual da massa (DTA) com base na massa inicial nas taxas de aquecimento utilizadas neste trabalho para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).

A Figura 3.27 mostra a derivada percentual da massa com base na massa instantânea versus a temperatura da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).

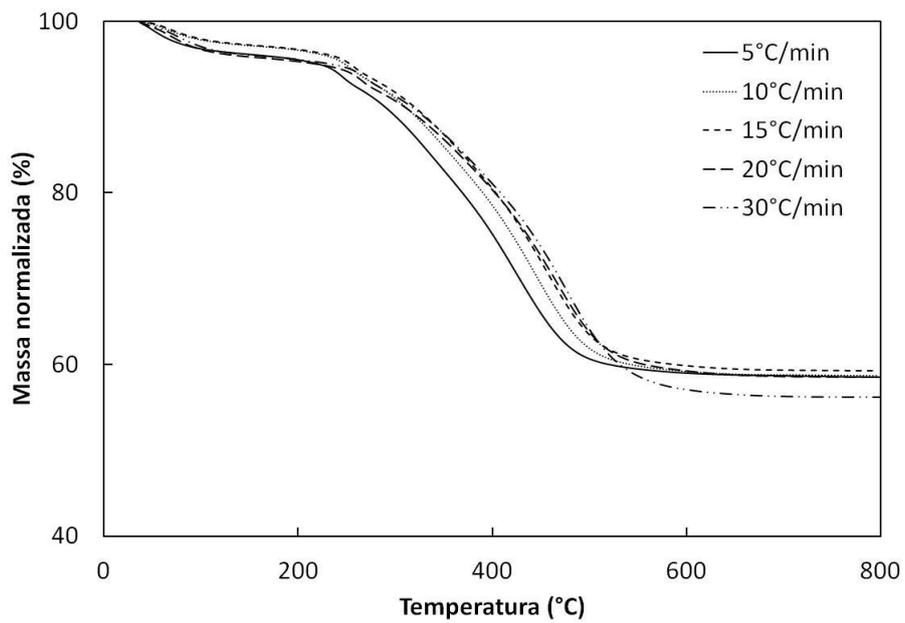
Como ocorreu com as demais amostras de turfa estudadas, o teor de material não pirolisado / não queimado não sofre alterações consideráveis com a variação da velocidade de aquecimento da amostra, ficando esta em torno de 58,1% em média. Este alto teor deve-se provavelmente, ao baixo valor de PCS (6666 J/g, ver Tabela 3.9) em comparação com os demais valores medidos, tendo a composição desta amostra, provavelmente, maior concentração de material inorgânico, ou até mesmo, material orgânico com cadeias moleculares complexas.

Figura 3.24 – Massa instantânea da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).



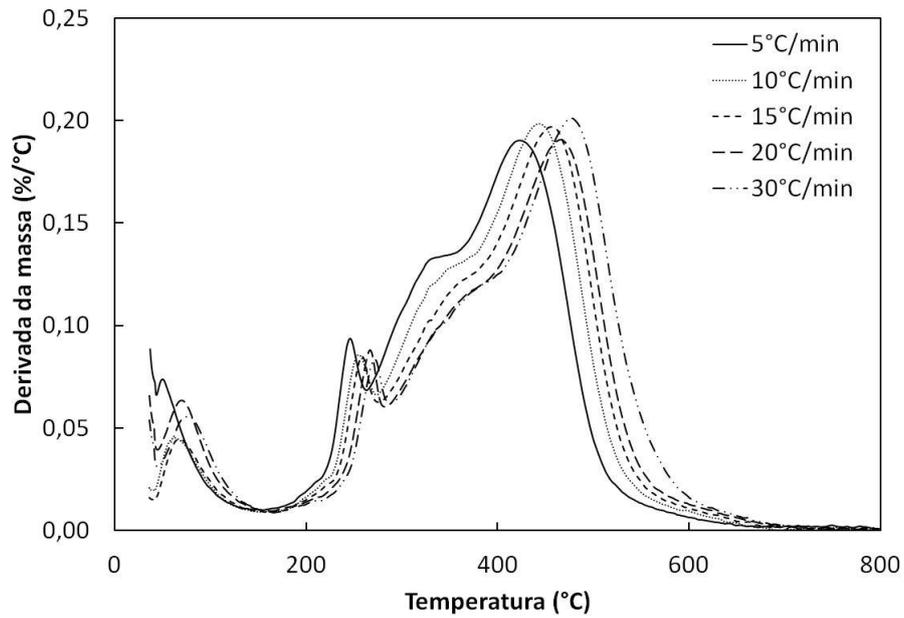
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.25 – Massa normalizada da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).



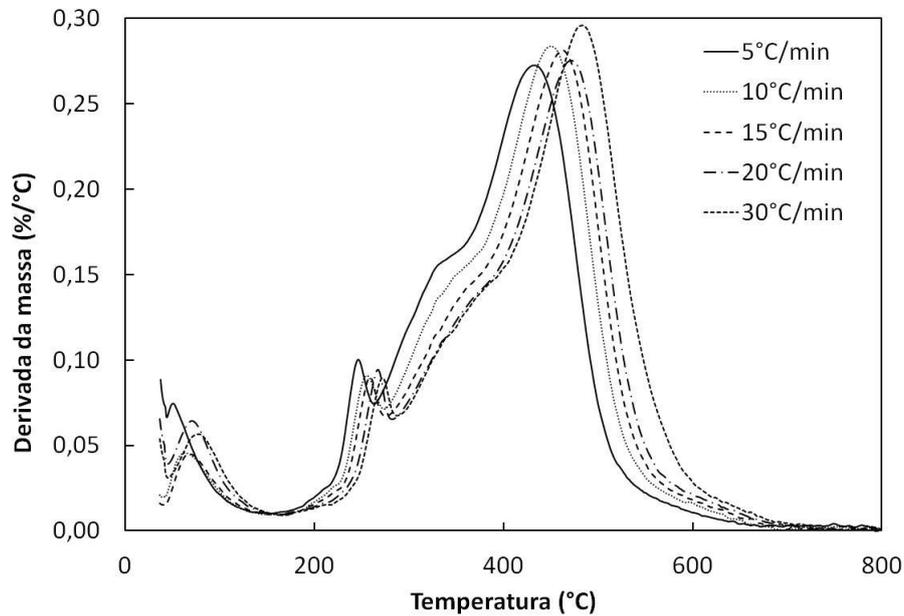
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.26 – Derivada da massa da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) com base na massa inicial.



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.27 – Derivada da massa da amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) com base na massa instantânea.



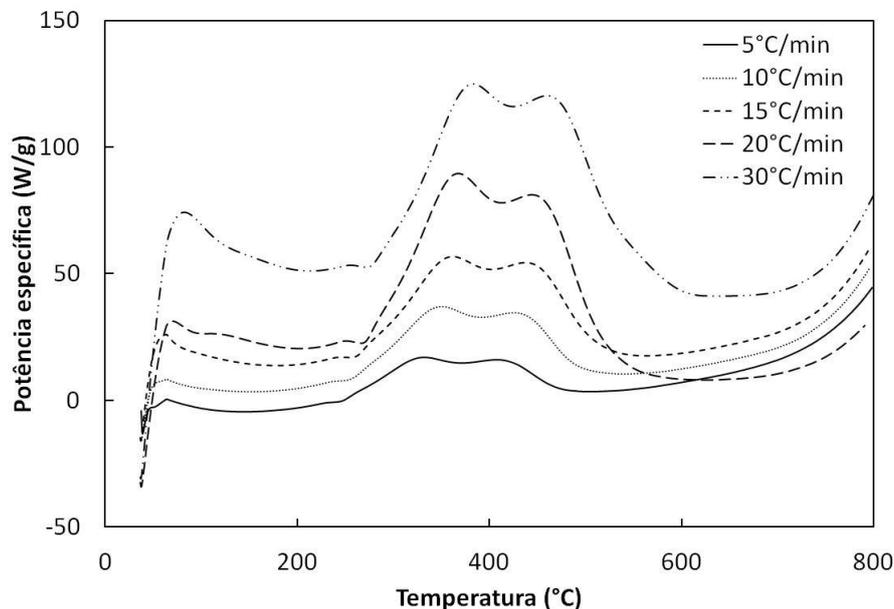
Fonte: Produção da autora.

A turfa é composta, principalmente por celulose, lignina e ácidos húmicos. A celulose é decomposta termicamente entre 315 e 400 °C (YANG, 2007), a lignina entre 350 e 500 °C (CONESA, 1995) e os ácidos húmicos entre 250 e 400 °C (MACCARTHY et al, 1985). Como as temperaturas de decomposição são próximas para os três compostos, não há uma separação clara no gráfico, como se pode ver na Figura 3.26.

A amostra de turfa B5 apresentou um pico um pouco mais acentuado na faixa de temperatura de 250-300 °C do que as outras amostras de turfa analisadas, como mostra a Figura 3.27. Isto provavelmente é devido à maior quantidade de material inorgânico ou até mesmo ácido húmico, visto a temperatura de decomposição térmica deste.

A Figura 3.28 mostra a troca térmica durante a calorimetria exploratória diferencial (DSC) nas taxas de aquecimento utilizadas neste trabalho para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).

Figura 3.28 – Troca térmica na amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).



Fonte: Produção da autora.

A análise da troca térmica para a amostra B5 também mostra a suavização da curva em taxas de aquecimento mais baixas.

Como pode-se verificar pelos gráficos acima (3.4 a 3.28), as amostras de turfa apresentam três estágios distintos durante a decomposição térmica, especificamente, a secagem (desidratação), a combustão e a incandescência (oxidação do carvão), verificado pelo gráfico de perda de massa e TGA.

As amostras utilizadas nos testes passaram pelo processo de secagem, porém, ainda possuem umidade residual, além de que, absorvem umidade do ar ambiente antes da análise termogravimétrica, mesmo mediante todos os cuidados aplicados para que isso não ocorra, como por exemplo, o armazenamento das amostras em sacos herméticos e acondicionados em dessecador.

Pelo gráfico de DTA é possível se fazer uma melhor avaliação sobre a perda de massa. Na etapa de desidratação, pode-se verificar um pico de perda de massa em torno de 100 °C, que corresponde à perda da água. Nas etapas de pirólise e de combustão, ocorre a decomposição da matéria orgânica. Nestas fases, têm-se a pirólise e a queima de vários compostos existentes na turfa, por isso a formação de vários picos no gráfico, mesmo que sobrepostos.

No gráfico de DTA da amostra B1 (solo turfoso), pode-se observar, para a taxa de aquecimento de 5 °C/min, uma melhor separação dos picos nessa etapa de combustão.

As curvas de DSC medem a troca térmica durante o teste. Pode-se verificar neste gráfico um pico próximo dos 100 °C, que pode ser atribuído à perda de água, durante a etapa de desidratação. Segundo Leroy et al (2010), dióxido de carbono e traços de compostos orgânicos são liberados entre 100 e 200 °C. Nos gráficos gerados pelo software, pode-se observar que na fase de oxidação do carvão, ocorre uma diminuição do fluxo de calor, sem que ocorra perda de massa significativa.

Os gráficos gerados pelo software, que se encontram no Apêndice B, também fornecem o valor do PCS da amostra analisada, a qual é obtida através do cálculo da integral abaixo da curva correspondente à liberação

de calor (W/g). A tabela 3.10 apresenta uma comparação entre o PCS e o teor de material não queimado (MNQ), em termos de percentagem em relação à massa inicial da amostra, obtidos pelo Calorímetro IKA e pelo Analisador Térmico Simultâneo (ATS) nas velocidades de aquecimento da amostra de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min. Para a determinação dos teores de material não queimado para o Analisador Térmico Simultâneo foram determinados os valores médios para as cinco velocidades de aquecimento.

Tabela 3.10 – Comparação dos valores de PCS e MNQ obtidos no calorímetro e no analisador térmico simultâneo.

Amostra	PCS (J/g)						MNQ (%)	
	PCS IKA	T.A. do ATS (°C/min)					IKA	ATS média
		5	10	15	20	30		
A1	14048	13806	12666	13372	14101	12288	36,5	33,4
B1	16408	12882	14487	14556	13258	14392	20,4	29,1
B	18690	12191	-	18108	17318	18342	6,6	17,5
B2	19071	15369	15502	15211	14828	14101	7,5	14,9
B5	6826	5351	5711	5123	5534	5418	62,5	58,1

Fonte: Ana Maura Araújo Rocha

Pode-se observar que para todas as amostras analisadas, o valor do PCS gerado pelo software do Analisador Térmico Simultâneo foi menor do que o valor do PCS obtido pelo calorímetro IKA. Essa diferença de valor deve-se à diferença de análises realizadas em equipamentos diferentes e em condições diferenciadas das amostras, pois no calorímetro IKA foi utilizado como gás oxidante o oxigênio puro, o que permite se obter combustão completa a temperaturas maiores de combustão, enquanto que na análise térmica utilizou-se ar, além da temperatura de trabalho máxima ter sido fixada em 800 °C devido à calibração do analisador. Além

destes fatores, tem de se levar em consideração que as amostras de turfa não são homogêneas, e que no caso do calorímetro IKA utiliza-se em torno de 0,4 g de amostra, enquanto na análise térmica 5 mg e a probabilidade das amostras terem exatamente a mesma composição química é mínima, mesmo efetuando-se o quarteamento das amostras.

Quanto ao teor de material não queimado medidos no Calorímetro IKA e no Analisador Térmico Simultâneo, nota-se que as avaliações relativas aos diferentes equipamentos e oxidantes aqui também são válidas, porém esses valores não se alteram muito para baixos valores de PCS e estas diferenças são acrescentadas à medida em que se aumenta o PCS, obtendo maiores valores diferenciados para as amostras B e B2, as quais possuem os maiores PCS.

Isso ocorre provavelmente, porque nestas amostras há grande liberação de calor e, portanto, tem-se queima mais completa com baixos valores de material não queimado no calorímetro IKA. Porém, como para a análise térmica a temperatura é fixada em 800 °C, não é possível obter uma queima mais completa, gerando grande quantidade de material não queimado.

3.4.1 Obtenção dos parâmetros cinéticos

Os parâmetros cinéticos da pirólise e da combustão dentro do sistema termogravimétrico foram modelados com base no método de Ozawa (OZAWA, 1965), descrito no Capítulo 2.

3.4.2 Determinação da energia de ativação

Os dados utilizados para a determinação da energia de ativação da pirólise e combustão das amostras de turfa foram referentes às conversões $\alpha = 20, 30, 40, 50$ e 60% em massa. Conversões menores que 20% não foram adotadas neste trabalho devido às baixas correlações observadas com os ajustes lineares entre os dados.

As Figuras 3.29, 3.31, 3.33, 3.35 e 3.37 apresentam os gráficos do logaritmo da razão de aquecimento ($\ln \beta$) pelo inverso da temperatura

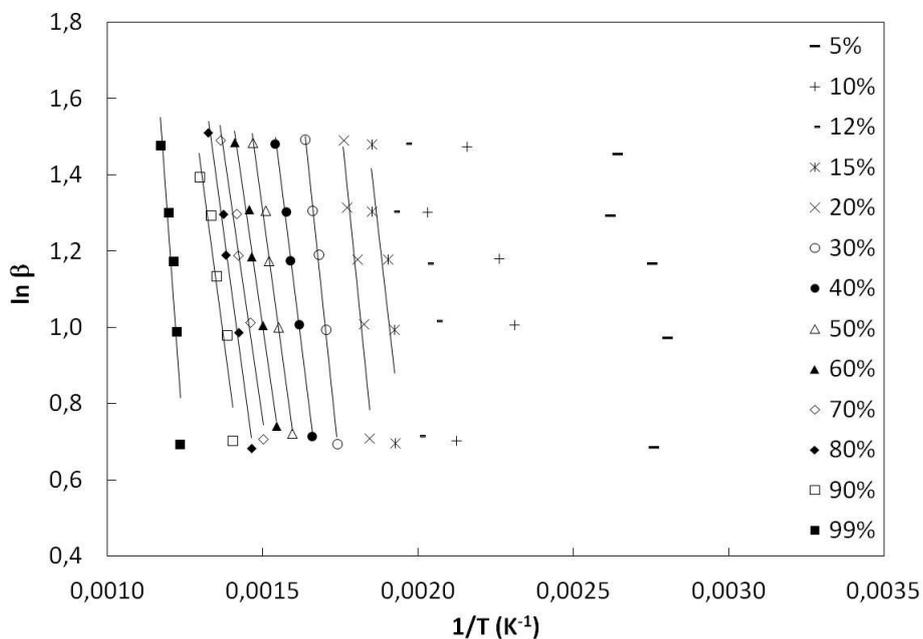
(1/T), para a determinação da energia de ativação segundo o método de Ozawa.

As Figuras 3.30, 3.32, 3.34, 3.36 e 3.38 apresentam os gráficos da temperatura de ativação (K) e coeficiente de correlação do ajuste linear em relação à temperatura de ativação versus a conversão em massa da amostra de turfa.

Para comparação de alguns resultados, adotou-se a temperatura de ativação que é a razão entre a energia de ativação e a constante universal dos gases: $T_a = E_a/R_o$.

No gráfico do logaritmo da razão de aquecimento (ln β) pelo inverso da temperatura (1/T), foram plotados pontos além dos necessários para a determinação da energia de ativação, para observação do comportamento do gráfico.

Figura 3.29 – Logaritmo da razão de aquecimento (β) versus o inverso da temperatura para a amostra A1 (solo turfoso).

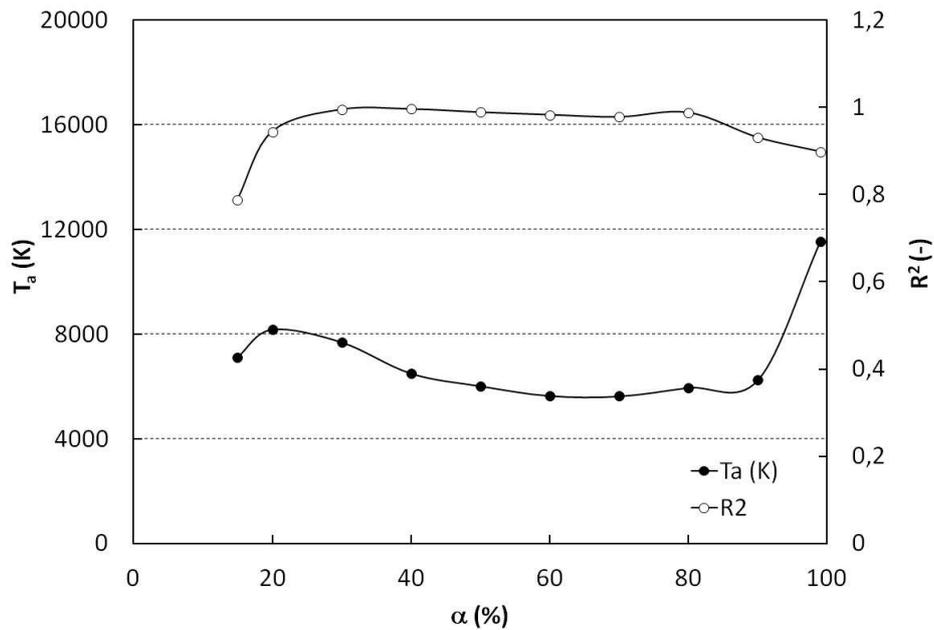


Fonte: Produção da autora.

Na Figura 3.29, pode-se observar uma elevada correlação para a amostra de turfa A1 (solo turfoso) nas faixas de conversão de 20 a 99%. Apesar

desta alta linearidade, para a determinação da energia de ativação, utilizou-se apenas as faixas de conversão entre 20 e 60%, respeitando o método utilizado.

Figura 3.30 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação à temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa A1 (solo turfoso).



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.30 mostra a relação entre a temperatura de ativação e o coeficiente de correlação para uma mesma conversão em massa da amostra. Para a amostra A1, pode-se observar uma alta correlação (entre 0,8 e 0,99) nas taxas de conversão de 20 a 99% em massa da amostra de turfa.

Na Figura 3.31, pode-se observar uma elevada linearidade para a amostra de turfa B, entre as faixas de conversão de 12 a 99%. Apesar desta alta linearidade, para a determinação da energia de ativação, utilizou-se apenas as faixas de conversão entre 20 e 60%, respeitando o método utilizado, com aproximação linear ajustada para esta faixa.

A Figura 3.32 mostra a relação entre a temperatura de ativação e o coeficiente de correlação para uma mesma conversão em massa da

amostra. Para a amostra B, podemos observar, uma correlação elevada (0,99) e praticamente constante para as taxas de conversão entre 15 e 99% em massa da amostra de turfa.

Na Figura 3.33, pode-se observar uma elevada linearidade para a amostra de turfa B1, entre as faixas de conversão de 15 a 99%. Apesar desta alta linearidade, para a determinação da energia de ativação, utilizou-se apenas as faixas de conversão entre 20 e 60%, respeitando o método utilizado.

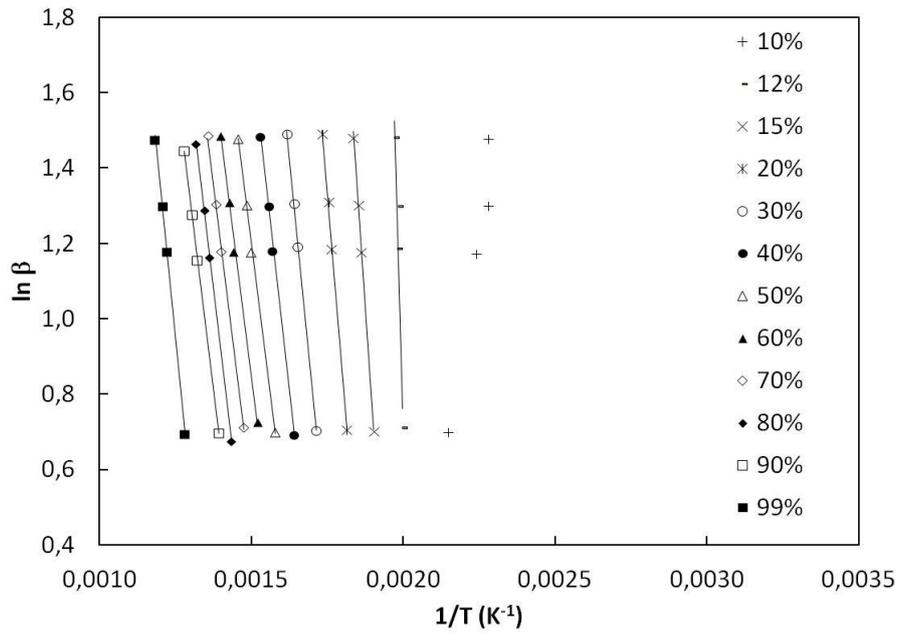
A Figura 3.34 mostra a relação entre a temperatura de ativação e o coeficiente de correlação para uma mesma conversão em massa da amostra. Para a amostra B1, pode-se observar, uma correlação elevada (entre 0,94 e 0,99) para as taxas de conversão entre 20 e 99% em massa da amostra de turfa.

Na Figura 3.35, pode-se observar uma elevada linearidade para a amostra de turfa B2, entre as faixas de conversão de 15 a 99%. Apesar desta alta linearidade, para a determinação da energia de ativação, utilizou-se apenas as faixas de conversão entre 20 e 60%, respeitando o método utilizado.

Para a amostra de turfa B2, a correlação apresentou uma maior variação na linearidade (entre 0,78 e 0,99) para as mesmas taxas de conversão das amostras anteriormente analisadas.

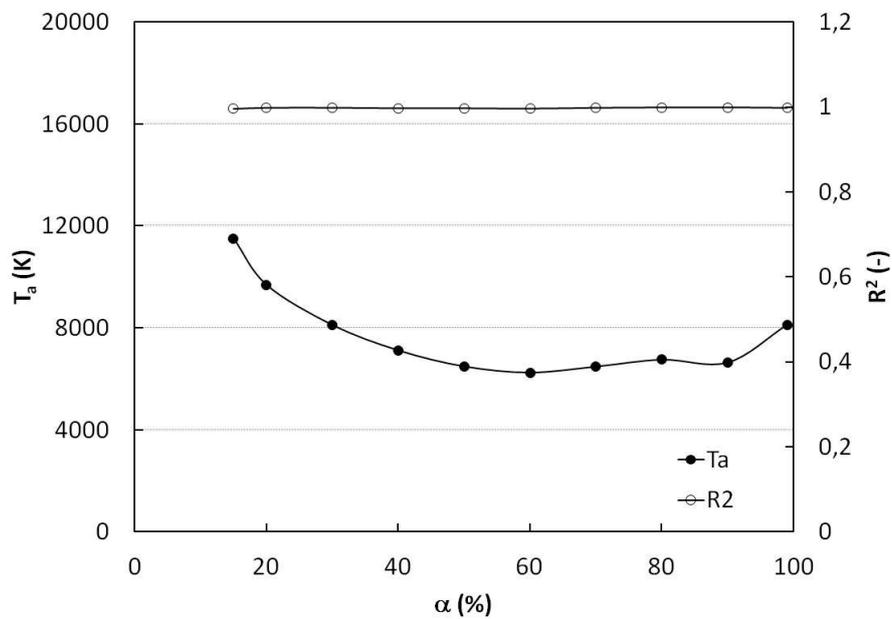
A amostra B5 apresentou linearidades variadas (entre 0,5 e 0,99) para as taxas de conversão analisadas. Para a determinação da energia de ativação para essa amostra, desconsiderou-se também a taxa de conversão de 20% pela sua baixa linearidade (0,6318).

Figura 3.31 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B (turfa fibrosa).



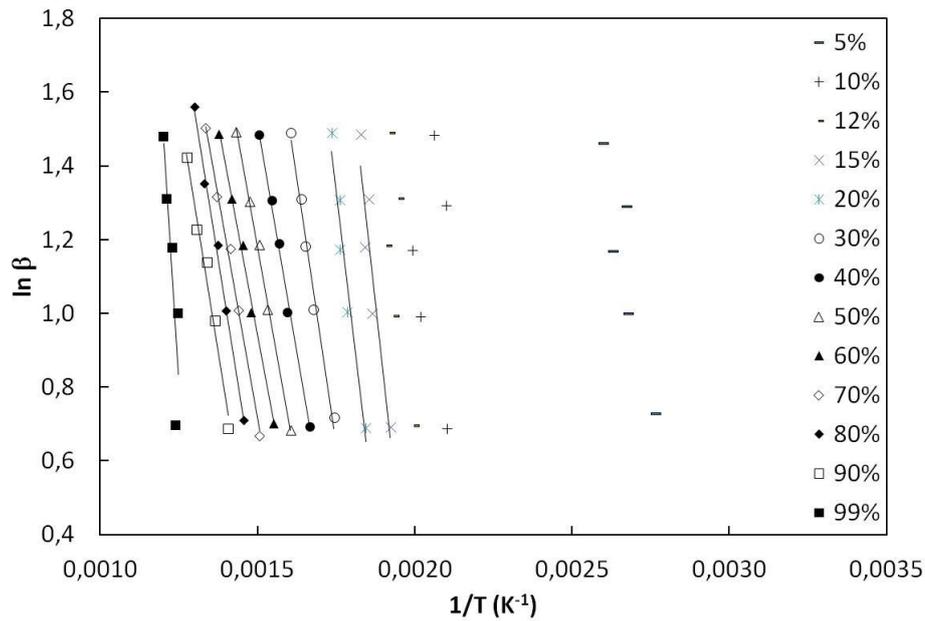
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.32 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B (turfa fibrosa).



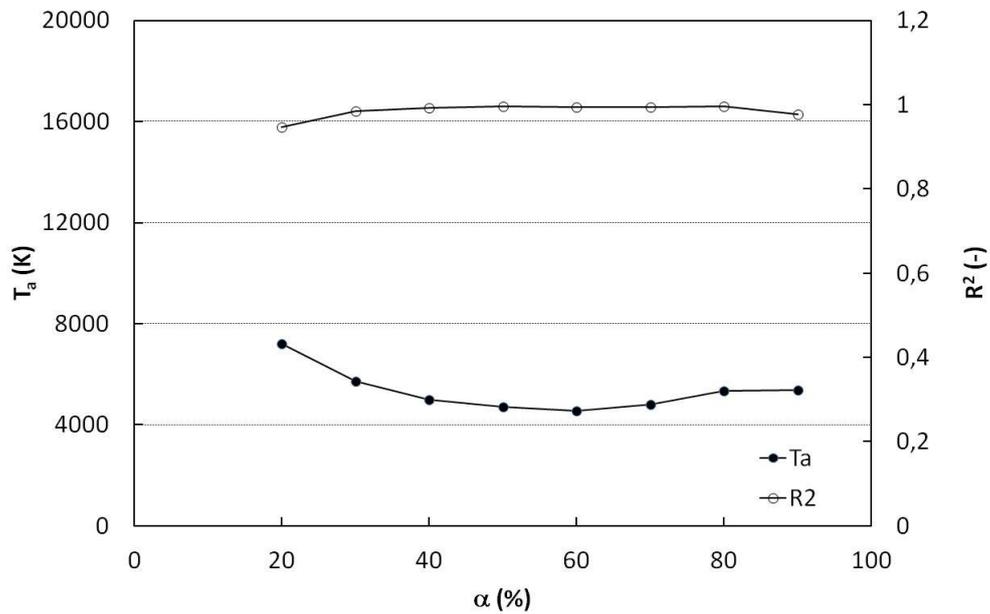
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.33 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B1 (solo turfoso).



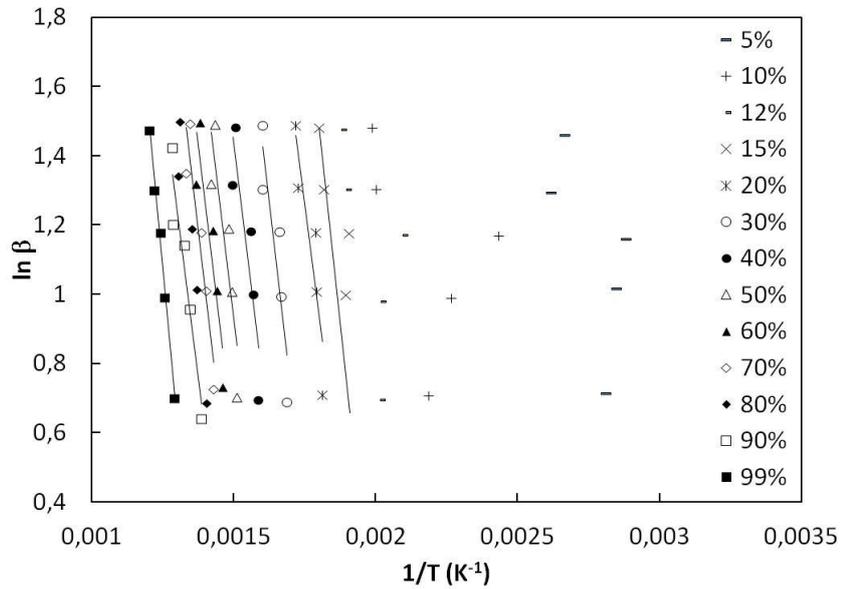
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.34 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B1 (solo turfoso).



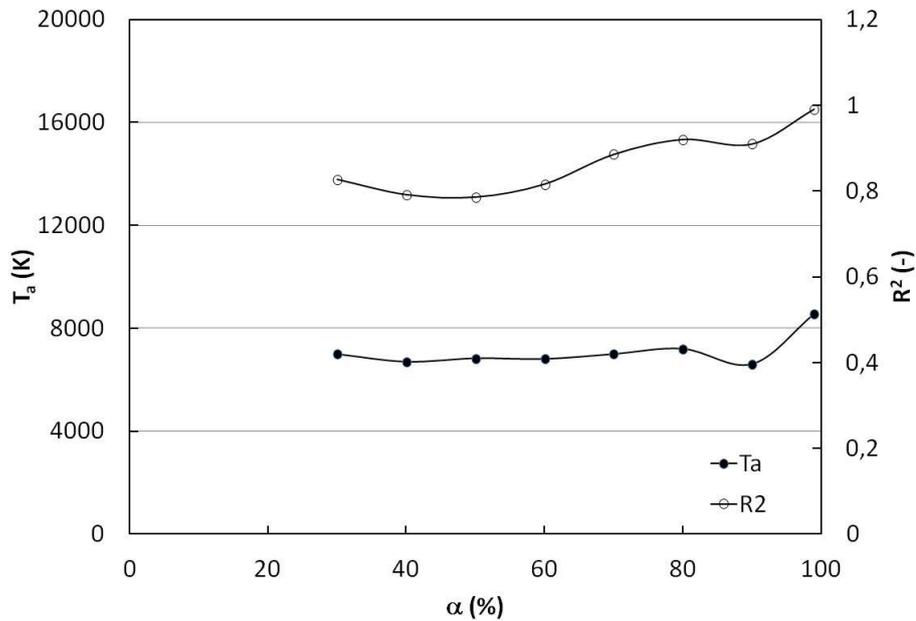
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.35 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B2 (turfa fibrosa).



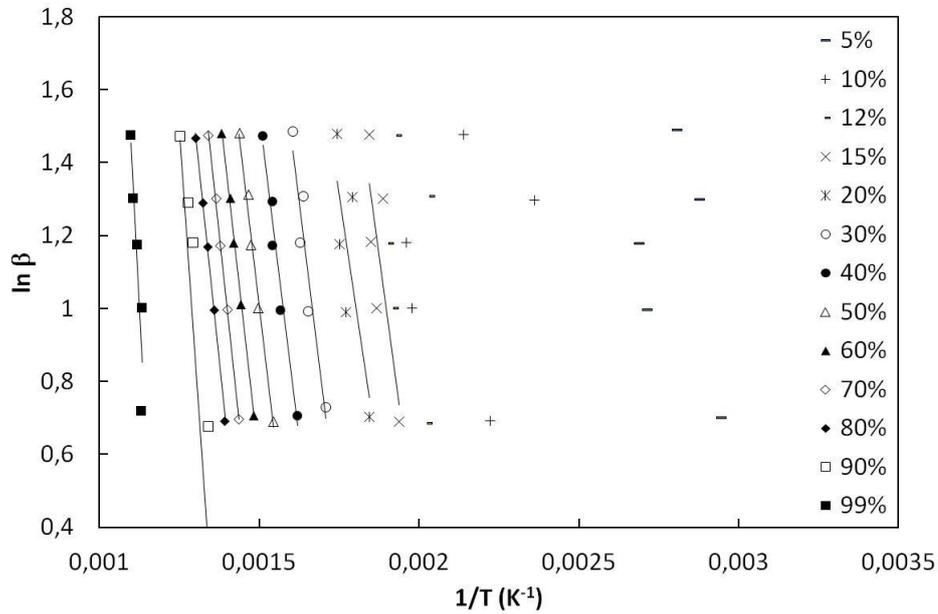
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.36 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B2 (turfa fibrosa).



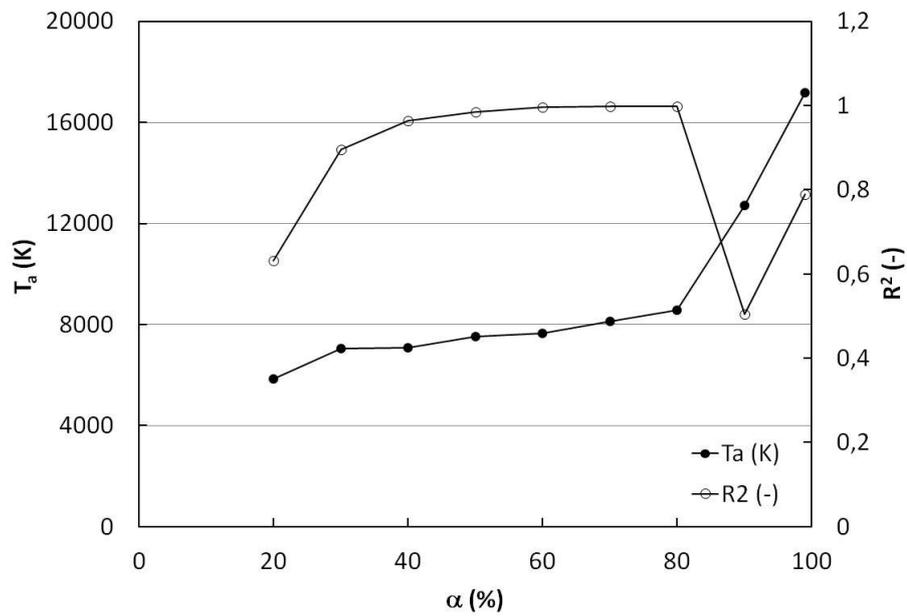
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.37 – Logaritmo da razão de aquecimento versus o inverso da temperatura para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica).



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.38 – Temperatura de ativação (T_a) e coeficiente de correlação em relação a temperatura de ativação (R^2) versus a conversão em massa da amostra de turfa B5 (turfa fibrosa/hêmica).



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.38 mostra uma correlação elevada entre as taxas de conversão de 30 a 80%, com uma drástica diminuição a partir dos 80% de conversão em massa. Essa diferença entre as outras amostras de turfa analisadas, pode ser atribuída ao tipo de turfa, pois a amostra B5 é uma turfa fibrosa/hêmica, que possui um menor teor de hidrocarboneto.

A Tabela 3.11 mostra as faixas dos valores encontrados para a energia de ativação das amostras em questão (XX, YY, ZZ, WW, etc).

Tabela 3.11 – Energia de ativação para as amostras de turfa.

Amostra	Energia de ativação (J/mol)
Solo turfoso (A1 e B1)	42957 - 53842
Turfa fibrosa (B e B2)	53299 - 59622
Turfa fibrosa/hêmica (B5)	55594

Fonte: Produção da autora.

3.4. Determinação do fator pré-exponencial

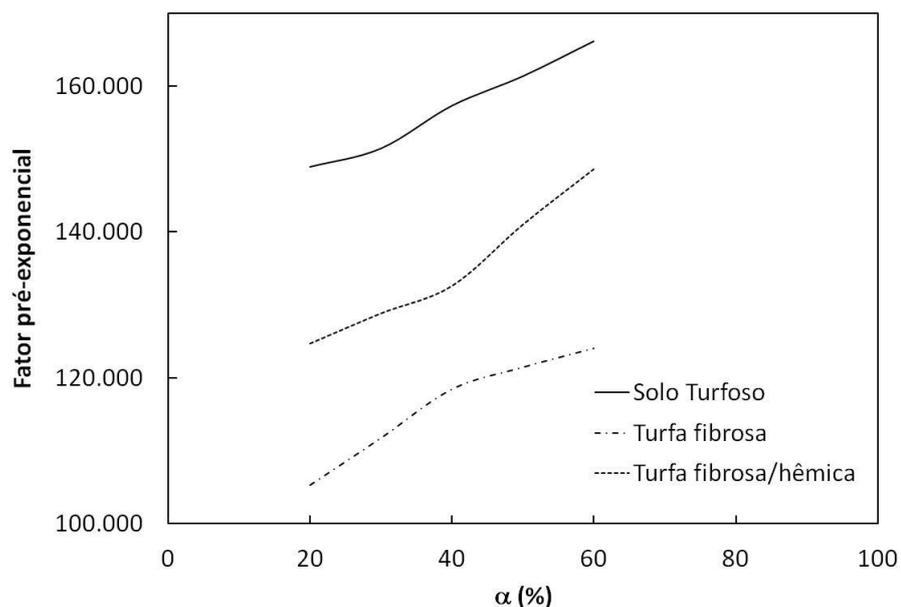
Conforme o método de Ozawa, o fator exponencial para a decomposição térmica da turfa pode ser obtido de

$$A = \exp\left(c - \ln \frac{E_a}{R_o} + \ln F(\alpha) + 5,3305\right) \quad (3.1)$$

Considerando uma ordem de reação $n = 1$, tem-se $F(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$.

A Figura 3.39 mostra os valores de fator pré-exponencial A versus a conversão α .

Figura 3.39 – Fator pré-exponencial (A) versus a conversão (α).



Fonte: Produção da autora.

A Tabela 3.12 mostra as faixas dos valores do fator pré-exponencial encontrados para as amostras analisadas (A1, B2 e B5).

Tabela 3.12 – Fator pré-exponencial para as amostras de turfa.

Amostra	Fator pré-exponencial
Solo turfoso (A1)	148970 - 166163
Turfa fibrosa (B2)	105321 - 124057
Turfa fibrosa/hêmica (B5)	124656 - 148609

Fonte: Produção da autora.

Pode-se observar na Figura 3.39, para as três amostras de turfa analisadas, que ocorre um aumento no valor do fator pré-exponencial com o aumento da conversão em massa da amostra.

3.5 Queima em calorímetro cônico

Para a realização da queima de amostras de turfa em calorímetro cônico, foram utilizadas duas amostras de turfa, sendo uma amostra de solo turfoso (A1) e uma amostra de turfa fibrosa (B2).

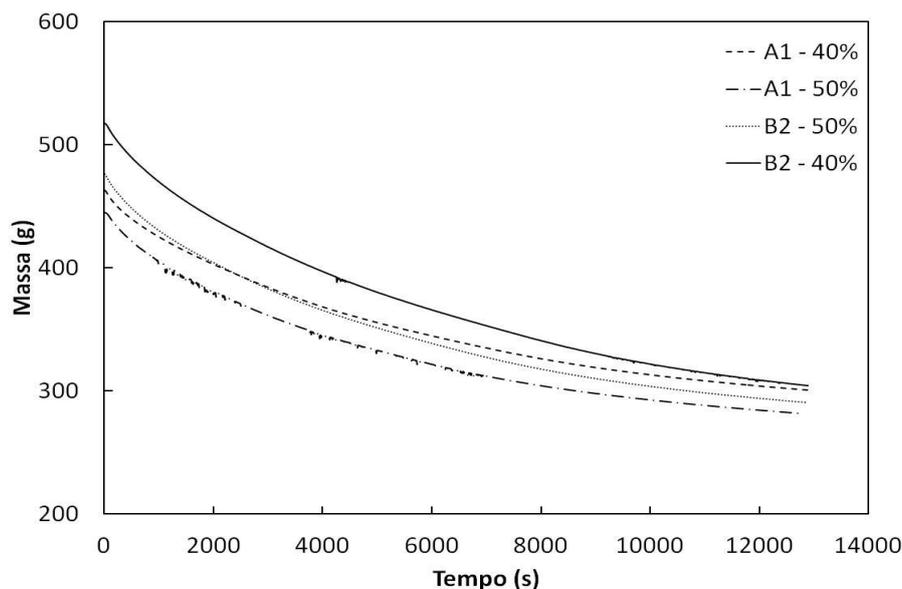
Para a análise de perda de massa, foram utilizadas 40 e 50 % da potência da resistência elétrica do calorímetro (5.000 W). Tais potências foram utilizadas anteriormente (GEMAQUE, 2012) e permitiram obter a ignição das amostras.

A Figura 3.40 mostra massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante a análise no calorímetro cônico.

Pode-se verificar que para as duas amostras, não houve uma mudança significativa na perda de massa (aproximadamente 6,5%) ao se aumentar em 10% a potência utilizada no experimento, ou seja, ao se utilizar 50% da potência total em vez de 40%.

Desta forma, para a análise da concentração de O_2 nos produtos durante a queima da amostra de turfa, bem como análise da temperatura da exaustão dos gases, da temperatura da amostra de turfa em sua superfície e da emissão de gases (CO_2 , CO , NO_x e UHC), para as duas amostras de turfa (A1 e B2), considerou-se a potência de 40% da potência total disponível pela resistência do calorímetro cônico.

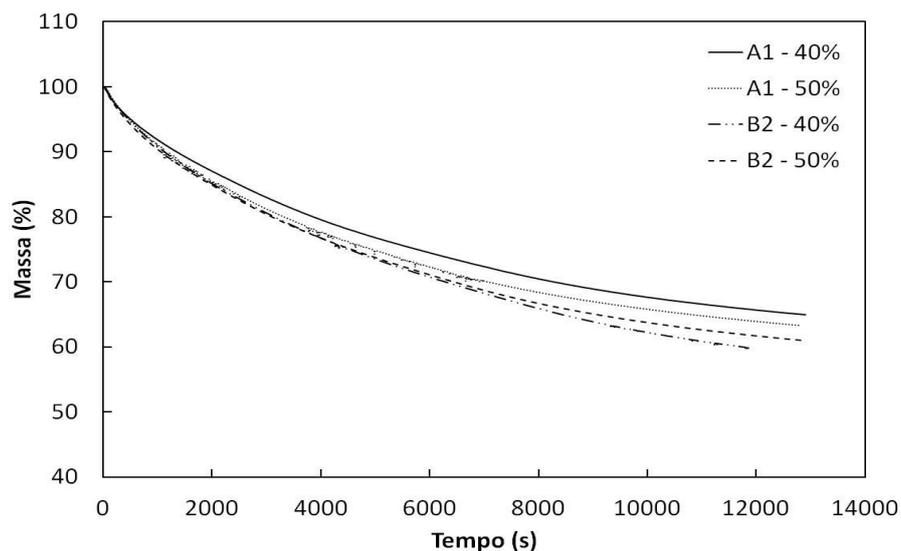
Figura 3.40 – Massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante análise em calorímetro cônico utilizando 40 e 50% da potência da resistência elétrica, de 5000W.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.41 mostra a normalização da massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante análise em calorímetro cônico, utilizando 40 e 50% da potência da resistência elétrica.

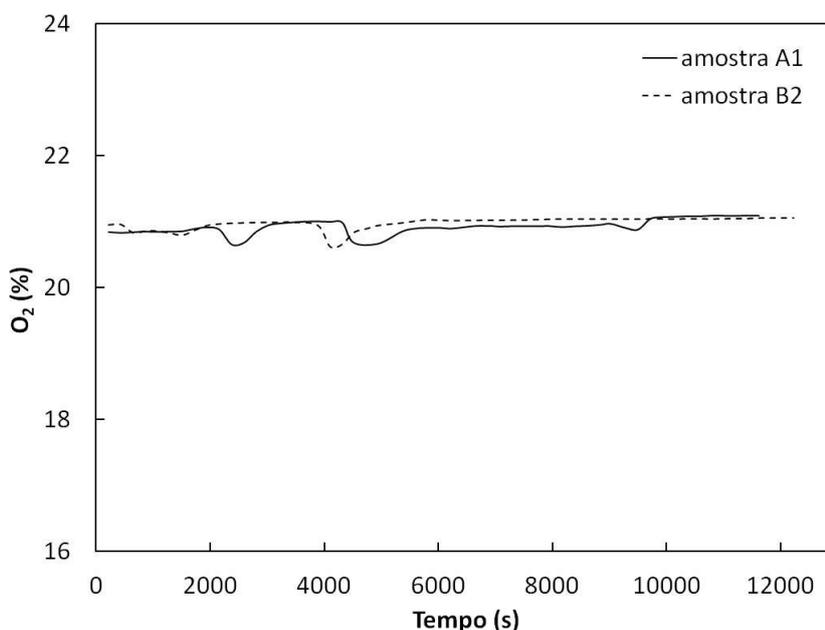
Figura 3.41 – Normalização da massa instantânea das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) durante análise em calorímetro cônico, utilizando 40 e 50% da potência da resistência elétrica.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.42 mostra a fração molar de O_2 nos produtos durante a queima das amostras de turfa no calorímetro cônico, com 40 % da potência.

Figura 3.42 – Fração molar de O₂ na exaustão dos produtos durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.



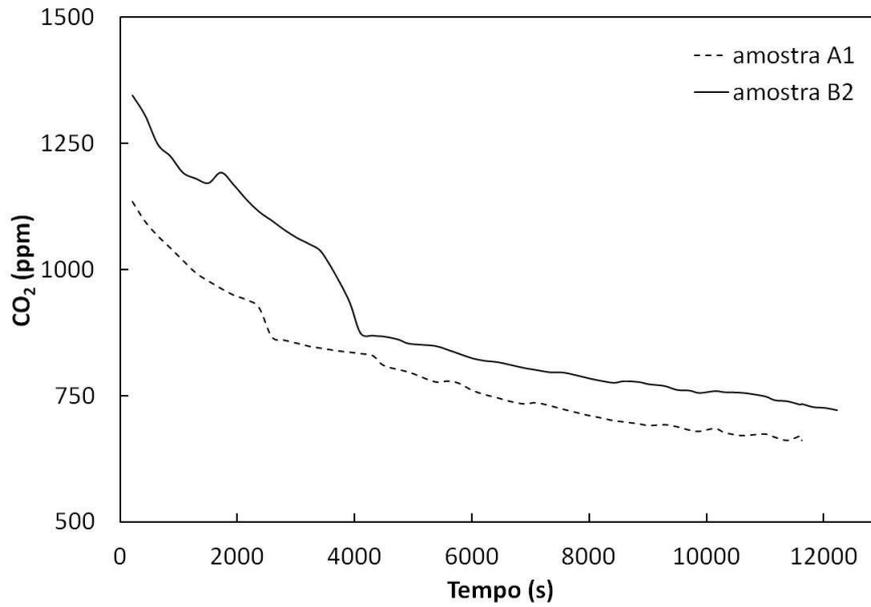
Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.42 mostra que, tanto para amostra A1 (solo turfoso) quanto para a amostra B2 (turfa fibrosa), a fração molar de O₂ ficou em torno de 21%, próxima à fração de O₂ no ar atmosférico de aproximadamente 20,95%.

As Figuras 3.43, 3.44, 3.45 e 3.46 apresentam os gráficos referentes à emissão de gases na exaustão, respectivamente, CO₂, CO, NO_x e UHC para as amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).

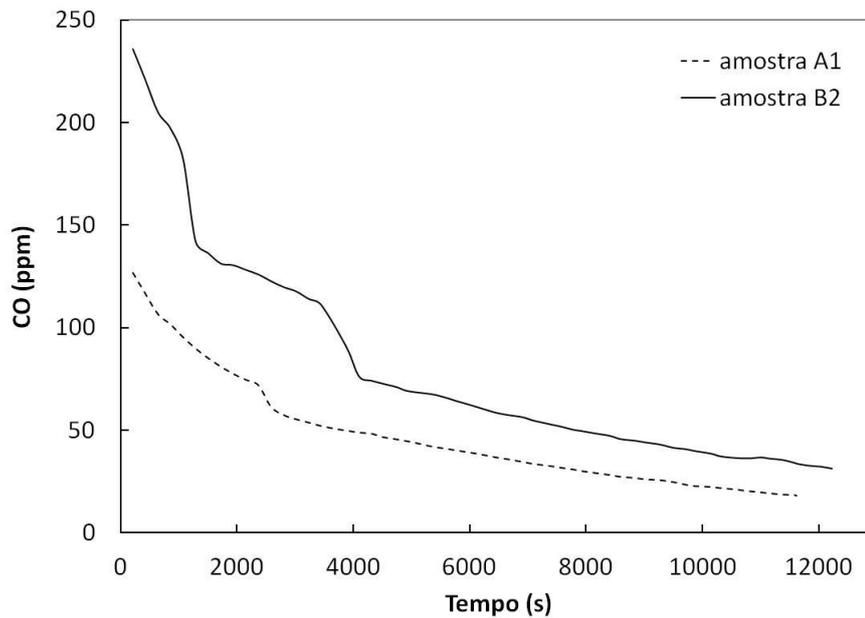
A Figura 3.43 mostra que houve uma maior emissão de CO₂ com a amostra B2, que é uma amostra de turfa fibrosa, o que se mostra coerente, pois o valor do PCS medido é maior para a amostra B2 (19071 J/g) do que para a amostra A1 (14048 J/g). Para a amostra B2, há maior quantidade de carbono disponível, verificado pelo valor mais elevado de PCS e também pela análise de CHNS, que apresentou maior quantidade de carbono (ver Tabela 3.8), e desta forma, há maior probabilidade de geração e oxidação do CO em CO₂ do que para a amostra A1.

Figura 3.43 – Emissões de CO₂ durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.



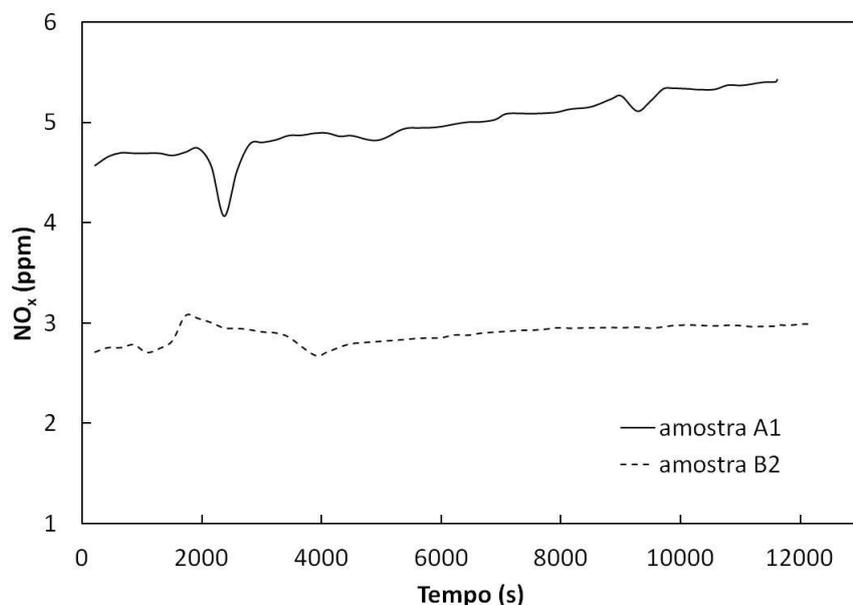
Fonte: Produção da autora.

Figura 3.44 – Emissões de CO durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.



Fonte: Produção da autora.

Figura 3.45 – Emissões de NO_x durante a queima de amostras de turfa no calorímetro cônico.

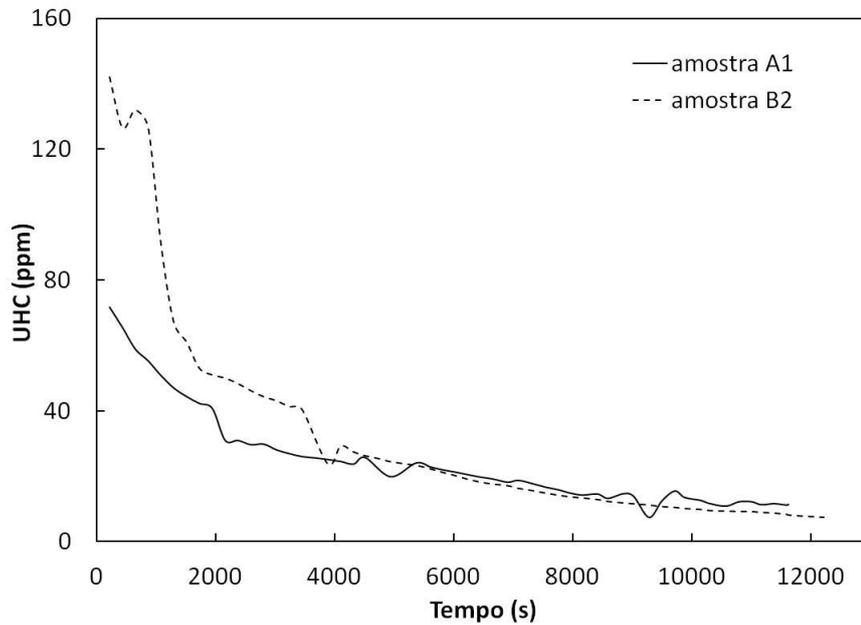


Fonte: Produção da autora.

Pela Figura 3.44, verifica-se que a amostra B2 proporciona maiores emissões de CO (comparado à A1), comprovando a justificativa acima de que provavelmente há maior teor de hidrocarboneto em sua composição.

Pela Figura 3.45 pode-se verificar que as emissões de NO_x são extremamente baixas para as duas amostras (entre 2,5 e 5 ppm), estando estes valores dentro do erro de leitura do analisador de NO_x . Porém, caso este seja realmente formado (embora em baixas concentrações), provavelmente, é referente ao NO_x presente no combustível (ver Tabela 3.8), visto que as reações não atingem temperatura suficiente para a formação do NO_x térmico, ou possuem excesso de ar o suficiente para a formação do NO_x via N_2O , descartando-se aqui também o NO_x prompt, visto que este se forma antes da zona de reação. Observa-se que a amostra de turfa A1 (solo turfoso) produz maiores emissões de NO_x (embora os valores sejam extremamente pequenos).

Figura 3.46 – Emissões de UHC durante a queima de amostras de turfa no calorímetro cônico.

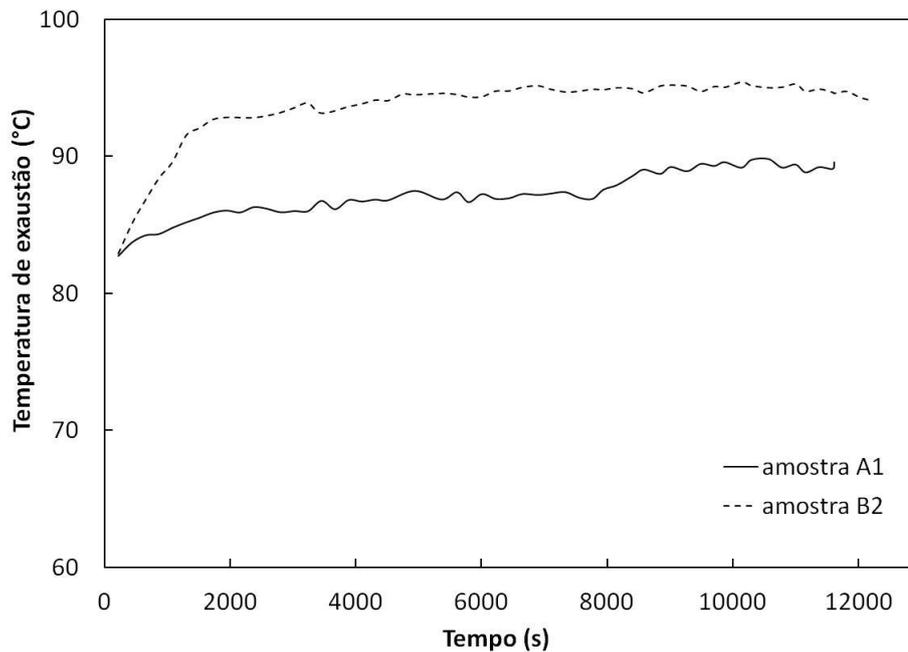


Fonte: Produção da autora.

Através da Figura 3.46 verifica-se que as emissões de UHC da amostra B2 (turfa fibrosa) são maiores que as da amostra A1 (solo turfoso) na fase inicial da queima até cerca de 3880 s (aproximadamente 1 hora) e posteriormente as emissões de ambas as amostras se tornam praticamente iguais. Este comportamento provavelmente se deve à maior quantidade de hidrocarboneto disponível na amostra B2, o que vem a complementar as análises feitas para o CO e CO₂ acima.

A Figura 3.47 mostra a temperatura na exaustão medida pelo analisador de gases para as amostras de turfa.

Figura 3.47 – Temperatura na exaustão medida pelo analisador de gases durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico.

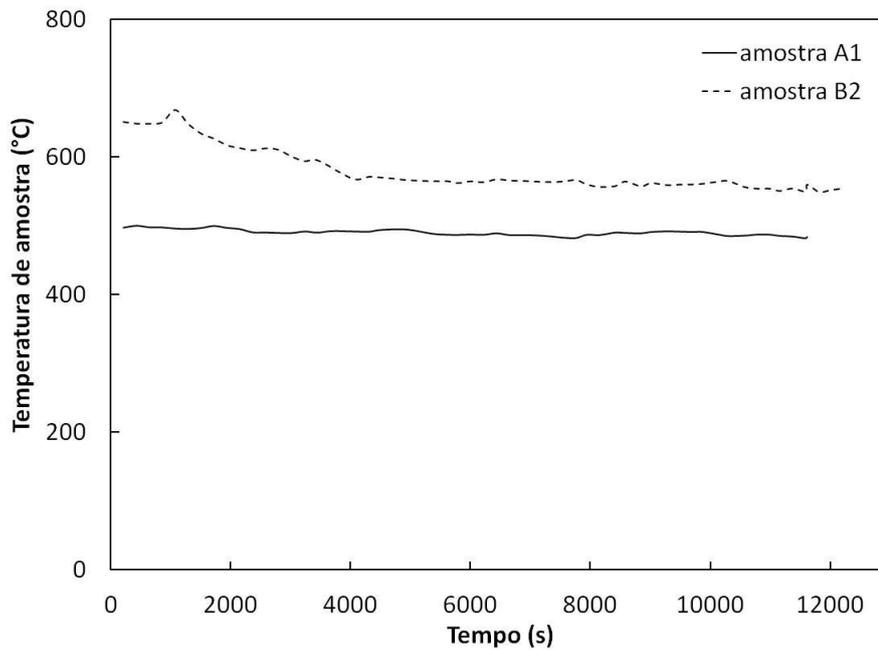


Fonte: Produção da autora.

Mediante a Figura 3.47 verifica-se que a amostra de turfa B2 (turfa fibrosa) possui maior temperatura na exaustão, pois nesta, há maior liberação de calor no processo de combustão devido ao maior teor de carbono presente, o qual será oxidado a CO_2 liberando mais energia que a amostra A1. Verifica-se ainda que depois de iniciado o processo de queima, as temperaturas se mantêm razoavelmente estáveis.

A Figura 3.48 mostra as temperaturas das amostras A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa) medidas durante o experimento de queima em calorímetro cônico, tendo sido colocado o termopar (tipo K) faceado com a superfície das amostras, permitindo desta forma verificar a temperatura de auto-ignição destas e monitorá-las durante todo o processo de queima.

Figura 3.48 – Temperatura próxima à superfície das amostras de turfa.

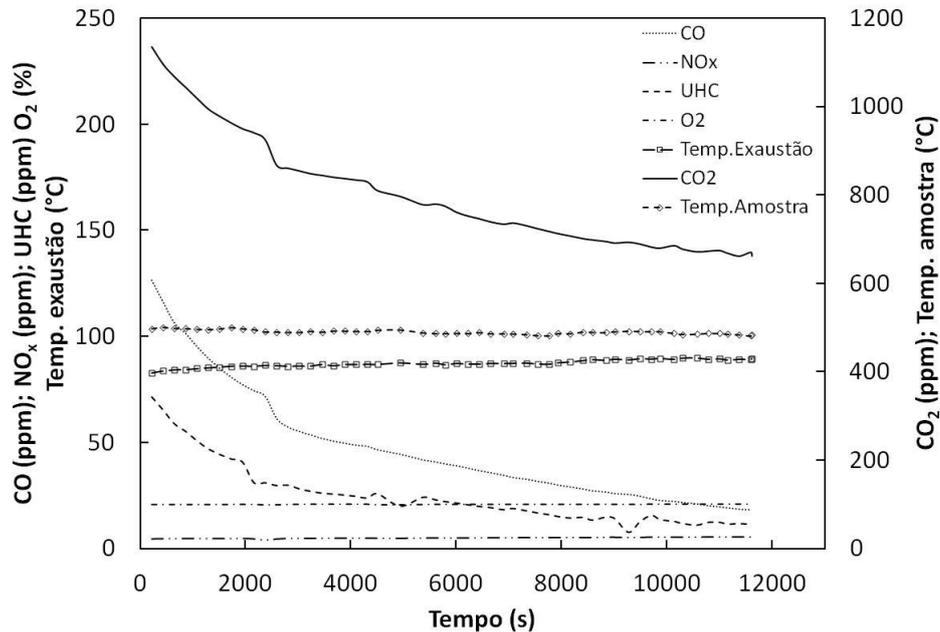


Fonte: Produção da autora.

Como previsto, a temperatura da amostra B2 é maior, ver figura 3.47, devido à maior liberação de calor desta amostra, seguindo-se a mesma análise realizada para a Figura 3.48.

As Figuras 3.49 e 3.50 mostram as concentrações de O₂, CO₂, CO, NO_x e UHC, e temperatura na exaustão e na superfície da amostra, medidos durante todo o experimento de queima no calorímetro cônico para a amostra A1, de solo turfoso, e para a amostra B2, de turfa fibrosa.

Figura 3.49 – Fração molar de O₂, CO₂, CO, NO_x e UHC, e temperaturas na exaustão/superfície amostra para a amostra A1 (solo turfoso).

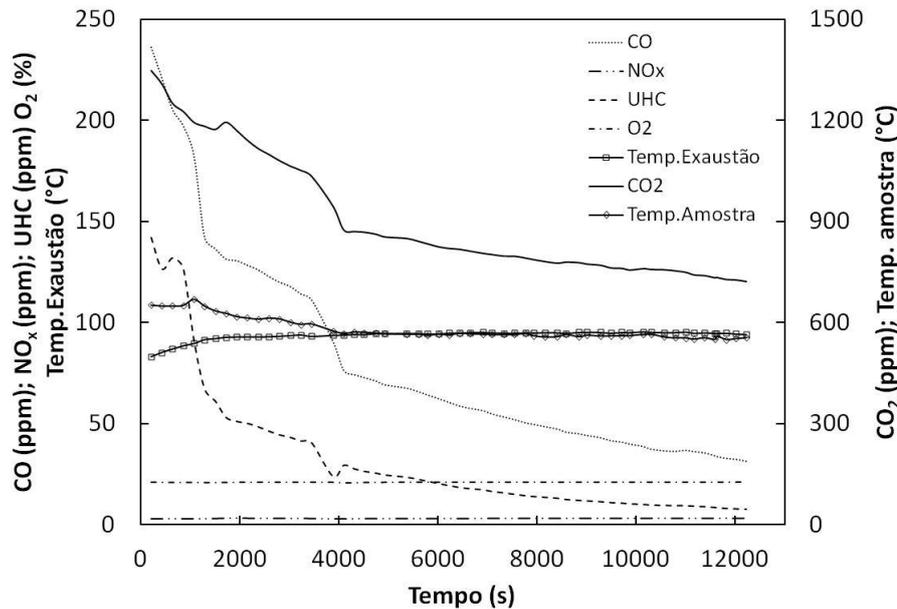


Fonte: Produção da autora.

Na Figura 3.49 podemos observar a coerência existente nas reações que ocorrem neste processo de combustão. Quando se inicia o processo de queima, verifica-se que há maior emissão de UHC, o qual vai caindo à medida em que o tempo decorre e a amostra vai perdendo sua massa. Este comportamento é o mesmo para o CO e CO₂, visto que o hidrocarboneto se converte em CO e posteriormente em CO₂. O O₂ se mantém praticamente constante, visto ter sido utilizado aqui o ar atmosférico, sendo este um comportamento esperado.

As temperaturas na exaustão e na amostra se mostram razoavelmente constantes, sendo estas medidas também esperadas, visto haver uma fonte externa de aquecimento no arranjo experimental. A diferença na constância destas temperaturas se torna visível, ao se queimar diferentes amostras com diferentes composições químico/físicas. Quanto ao NO_x, como já discutido, este é constante e se encontra dentro do erro de leitura do analisador.

Figura 3.50 – Fração molar de O₂, CO₂, CO, NO_x e UHC, e temperaturas na exaustão/superfície amostra para a amostra B2 (turfa fibrosa).

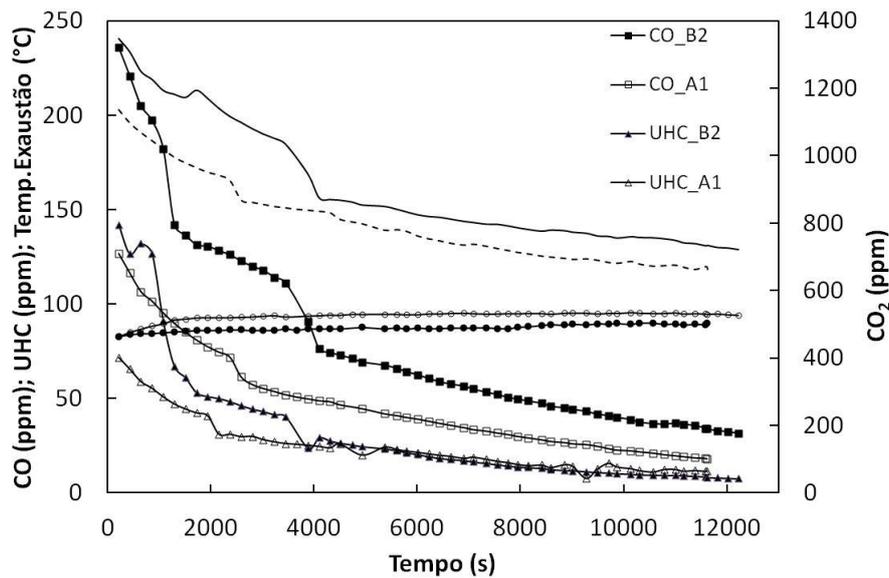


Fonte: Produção da autora.

Com a Figura 3.50 podemos verificar que tem-se aqui a mesma análise realizada para a Figura 3.49, com a diferença de que para esta amostra, de turfa fibrosa, o poder calorífico se mostra maior, ver Tabela 3.6, o que faz com que provavelmente haja uma liberação maior de voláteis no início da reação de queima, fazendo com que a temperatura da amostra seja maior neste período e depois decresça um pouco e se torne estável. Isto faz com que haja também aumento da temperatura na exaustão, neste período inicial do teste, a qual posteriormente se torna praticamente constante. Verifica-se um pico de concentração de UHC em 650 segundos de decorrência do teste, promovendo aumento na concentração de CO em torno 870 segundos, e na temperatura em 1080 segundos, havendo um aumento na concentração de CO₂ em 1200 segundos, mostrando-se que há coerência nas reações químico/físicas no experimento, visto ser esta a sequência geral de reações esperadas no processo de combustão. Quanto ao NO_x e O₂, mantém-se as observações realizadas para a amostra A1.

A Figura 3.51 mostra uma comparação das concentrações de CO₂, CO e UHC e da temperatura de exaustão para as amostras de turfa A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).

Figura 3.51 - Comparação das concentrações de CO₂, CO e UHC e da temperatura na exaustão para as amostras de turfa A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).



Fonte: Produção da autora.

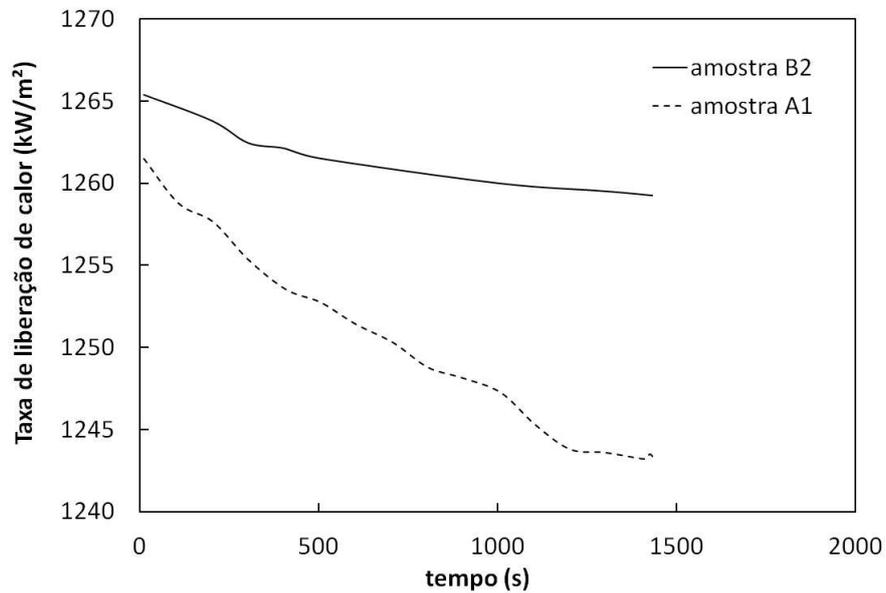
Pela Figura 3.51, nota-se que para a amostra B2, as concentrações de CO₂, CO e UHC são mais elevadas do que para a amostra A1. O mesmo acontece para a temperatura na exaustão. Esses dados estão em conformidade, visto que a amostra B2 possui maior teor de carbono, provavelmente, devido ao seu maior PCS.

3.5.1 Determinação da taxa de liberação de calor

Os dados obtidos durante a análise da queima das amostras de turfa no calorímetro cônico foram utilizados na equação 2.9 para a determinação da taxa de liberação de calor.

A Figura 3.52 mostra as taxas de liberação de calor de uma amostra de turfa A1 (solo turfoso) e uma amostra B2 (turfa fibrosa) ao longo do teste.

Figura 3.52 – Taxa de liberação de calor para as amostras de turfa A1 (solo turfoso) e B2 (turfa fibrosa).



Fonte: Produção da autora.

Pela análise do gráfico 3.52, a amostra B2 (turfa fibrosa) apresentou uma taxa de liberação de calor um pouco maior que a amostra A1 (solo turfoso). Isso ocorre porque essa amostra B2 possui um maior teor de carbono, e portanto libera uma maior quantidade de energia durante a combustão desta amostra.

Estes valores comprovam e complementam as análises realizadas para as emissões dos gases analisados e temperaturas na combustão, os valores de PCS e para a análise termogravimétrica, demonstrando coerência e confiabilidade na realização dos testes e interpretação dos resultados.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho determinou as características de pirólise oxidativa e de combustão de amostras de turfa coletadas em São José dos Campos, no vale do rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo.

Foram coletadas amostras de turfa fibrosa, turfa fibrosa/hêmica e de solo turfoso na turfeira SJ-II, localizada no município de São José dos Campos/SP.

Os valores medidos de umidade das amostras variaram de 58 % a 90 % em base úmida, conforme o tipo de turfa e o local e o momento da coleta das amostras.

As densidades médias aparentes calculadas das turfas fibrosa, fibrosa/hêmica e solo turfoso foram, respectivamente, 0,541, 0,585 e 0,527 g/cm³, enquanto as densidades sólidas foram 1,75535, 2,0235 e 1,5587 g/cm³.

Os poderes caloríficos superiores das amostras foram medidos em um calorímetro, conforme norma DIN51900, em oxigênio puro, e por meio de calorimetria exploratória diferencial com queima em ar.

A turfa fibrosa, a turfa fibrosa-hêmica e o solo turfoso apresentaram, respectivamente, poderes caloríficos superiores em torno de 15171, 6643 e 16800 J/g, obtidos em calorímetro, e de 15663, 5428 e 13581 J/g, obtidos por DSC. Verificou-se que o solo turfoso e a turfa fibrosa apresentam os maiores valores de PCS e, portanto, são, potencialmente, os tipos de turfa que mais contribuiriam para incêndios na região.

Foram realizadas análise termogravimétrica, calorimetria exploratória diferencial e a queima da turfa em calorímetro cônico.

A análise termogravimétrica foi realizada para estudar as características da decomposição térmica da turfa, incluindo pirólise oxidativa e combustão. O gráfico de DSC fornece o fluxo de calor durante a pirólise e a combustão da amostra.

No gráfico da derivada da massa (DTA), pode-se acompanhar melhor a perda de massa da amostra, em relação à massa inicial da amostra. Na etapa de desidratação, observa-se um pico de perda de massa em torno dos 100 °C, que corresponde à perda de água. Entre 400 °C e 500 °C, aproximadamente, ocorre a maior taxa de pirólise e oxidação, coincidindo com o maior fluxo de calor medido por DSC. Foram obtidos gráficos da derivada normalizada da massa em relação à massa instantânea, permitindo identificar melhor os picos de consumo da turfa durante o TGA.

O método de Ozawa foi empregado para a determinação das energias de ativação da pirólise oxidativa e da combustão da turfa, a partir dos resultados de TGA. Os valores médios encontrados de energia de ativação foram, respectivamente, 56461, 55594 e 48400 J/mol para amostras de turfa fibrosa, fibrosa/hêmica e de solo turfoso. O processo de combustão das amostras de turfa, em geral, pode incluir as fases de secagem, pirólise sem chama, pirólise com chama e incandescência. Na combustão em calorímetro cônico observou-se a predominância do processo de incandescência, similarmente ao observado na queima de depósitos de turfa.

A análise em calorímetro cônico (calorímetro de consumo de oxigênio) foi realizada, principalmente, para a determinação da emissão de alguns poluentes e determinação da taxa de liberação de calor das amostras testadas, de forma similar ao que ocorre em incêndios de turfa.

Foram queimadas uma amostra de turfa fibrosa (B2) e uma amostra de solo turfoso (A1) em calorímetro cônico. As emissões de UHC, CO e CO₂ foram maiores para a amostra B2, o que ocorre, provavelmente, pela maior quantidade de carbono disponível para essa amostra, o que pode ser observado também pelo maior valor de PCS que essa amostra possui. A emissão de NO_x é extremamente baixa, entre 2,5 e 5 ppm, para as duas amostras de turfa. Tanto a temperatura de exaustão quanto a temperatura da amostra são mais elevadas para a amostra B2, complementando a análise para a emissão de UCH, CO e CO₂, pois essa maior liberação de calor no processo de combustão deve-se ao maior teor de carbono

presente na amostra, que será oxidado a CO_2 , liberando, assim, mais energia, o que também aumenta a temperatura da amostra. Esses resultados demonstraram que a turfa fibrosa coletada é a que emite maiores concentrações de poluentes.

Durante a queima de amostras de turfa em calorímetro cônico verificaram-se valores máximos de emissão de 235 ppm de CO, 1346 de CO_2 , 3,1 de NO_x , 142 de UHC, no caso da turfa fibrosa, e valores máximos de emissão de 127 ppm de CO, 1135 de CO_2 , 5,4 de NO_x , 72 de UHC, no caso do solo turfoso. As taxa máximas de liberação de calor foram, respectivamente, 1245 kW/m^2 e 1206 kW/m^2 , para a turfa fibrosa e o solo turfoso.

Os resultados obtidos neste trabalho possibilitam um entendimento mais aprofundado dos processos de pirólise oxidativa e de combustão da turfa e podem fornecer subsídios a estudos teóricos e numéricos de processos de pirólise e combustão de turfa.

Trabalhos futuros podem incluir testes adicionais de amostras de outras áreas de São José dos Campos e de outras regiões do Estado de São Paulo e do Brasil, a análise termogravimétrica e a calorimetria diferencial de amostras em atmosfera inerte, a determinação dos fatores pré-exponenciais da constante de Arrhenius, a queima da turfa em câmara de combustão em diferentes condições, a realização de medidas de CHNS, execução de testes de propagação de queima, medidas de temperatura nas amostras em calorímetro cônico e outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. F. **Recursos minerais do Brasil**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.
- AGUIAR, S. C. **Fontes energéticas brasileiras: inventário / tecnologia: turfa**. Rio de Janeiro:CHESF, , 1987.
- ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. **Academia Brasileira de Ciências**, v.48, p.15-26, 1976.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E – 1354 – 03**: standart test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter. West Conshohocken, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16097**: solo: determinação do teor de umidade: métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2974-87**: standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils. Philadelphia, 1916.
- BROWN M. E. **Introduction to thermal analysis: technique and applications**. Dordrecht: Kluver Academic, p. 181-214. 2001
- BROWN P. A.; GILL S. A.; ALLEN S. J. Review paper: Metal removal from wastewater using peat. **Water research**, v.34, p. 3907-3916. 2000
- CHEN, H.; ZHAO, W.; LIU, N. Thermal analysis and decomposition kinectics of Chinese forest peat under nitrogen and air atmospheres. **Energy Fuels**, v.25, n.2, p.797-803, 2011.
- CHISTJAKOV, V. L. ET AL. Measures for fire: prevention on peat deposits. In: WEIN, R. W.; MACLEAN, D. A. **The role fire in northern circumpolar ecosystems**. USSR: Scope, 1983.
- CLYMO, R. S. **Peat. Mires: swamp, bog, fen and moor (ecosystems of the world)**. Amsterdan: Elsevier, 1983.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Projeto Caçapava: Minuta de relatório final**. São Paulo: CPRM, 1981. 29 f., il.
- CONESA, J. A. et al. Analysis of different kinect models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochimica Acta**, v.254, p.175-192, 1995.
- COSTA, F. S.; SANDBERG, D. Mathematical model of a smoldering log. **Combustion and Flame**, v. 139, n. 3, p. 227-238, Nov. 2004.

C200. **Calorimeter system:** instruction manual. Germany. 44p.

FILHO G. C. K.; COSTA F. S.; MENDES P. R. B.; FORTI M. C.; BORBA L. S.; ALVALÁ P. C.; NETO T. G. S.; CARDOSO M.; ROCHA A. M. A.; MATOS R.; UEDA N. P. Caracterização da queima da turfa para mitigação do impacto ambiental dos incêndios em turfeiras na região do Vale do Paraíba. **Projeto FAPESP 2015/24201-0**. 2015.

FUCHSMAN, C. H. **Peat – industrial chemistry and technology**. New York: Academic Press, 1980.

GAMBOA, A. A. R. **Estudo da combustão do óleo pirolítico de pneus**. 2016. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

GARCIA, M. J. **Palinologia de turfeiras quaternárias do médio vale do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GEMAQUE, M. J. A. **Características de inflamabilidade de materiais poliméricos com aplicação no setor aeroespacial**. 2012. 445p. Tese (Doutorado em Combustão e propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

GUTIÉRREZ, A.; ISABEL, M. Chemical characterization of lignin and lipid fractions in industrial hemp bast fibers used for manufacturing high-quality paper pulps. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.54, n.6, p.2138-2144, 2006.

HUANG X.; REIN G. Smoldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics. **Combustion and Flame**, v.161, n.6, p.1633-1644, 2014.

HUGGETT, C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. **Fire and Materials**, v.4, n.2, p.61-65, 1980.

HUGRON, S.; BUSSIÈRES, J.; ROCHEFORT, L. **Tree plantations within the context of ecological restoration of peatlands: practical guide**. Laval, Québec, Canadá: Peatland Ecology Research Group (PERG), 2013.

INTERNATIONAL PEATLAND SOCIETY (IPS). **Estudo da turfa**. Disponível em: <<http://www.peatlands.org/>>. Acesso em: abr. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Estudo das possibilidades de aproveitamento de turfa no Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1979.

IONASHIRO, M. **Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: GIZ, 2005.

JACKSON, S. T.; CHARMAN, D. J. Peatlands: paleoenvironments and carbon dynamics. **PAGES Newsletter**, v.18, n.1, p.3-4, 2010.

KEDDY, P. A. **Wetland ecology: principles and conservation**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

KEYS, D. **Effect of peat type and decompositions on the calorific value of some New Brunswick peats**. Philadelphia: ASTM, 1983.

KRAMER, A.E. **Incêndios em turfeiras na Rússia**. Disponível em; <<https://noticias.bol.com.br/internacional/20/08/2013/erros-humanos-antigos-sao-responsaveis-por-incendios-de-turfeiras-na-russia.jhtm>>. Acesso em: Nov. 2016.

LACAIVA, P. T. **Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos**. 2000. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

LENZ, G. R. Turfa – métodos de lavra e opções para uso no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v.14, n.2, p.111-119, 1984.

LEINZ, V.; AMARAL, S.E. **Geologia geral**. São Paulo: Editora Nacional, 1975.

LEMASTERS, G. S.; BARTELI, L. J.; SMITH, M. R. **Characterization of organic soil as energy sources: testing of peats and organics soils**. Philadelphia: ASTM, 1983.

LEROY, V.; LEONI, E.; CANCELLIERI, D. Thermal degradation of ligno-cellulose fuels: biopolymers contribution. In: ELNASHAR, M. M. (Ed). **Biopolymers**. Rijeka: Scyio, 2010.

LIMA, R. C. C; COSTA, I. V. G; SILVA, J. F; ROCHA, A. J. D. Turfa na faixa costeira Bahia-Sergipe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA,32., 1982, Salvador, BA. **Anais...** 1982.

MACCARTHY, P. RICE, J. A. In: Aiken et al (Eds). **Humic substances in soil, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

MARCONCINI J. M.; OLIVEIRA R. M. Termogravimetria de cascas de arroz. **EMBRAPA**. P. 6, 2007.

MONTICELI, J. J.; BATISTA, J. J. História da mineração de combustíveis fósseis sólidos no estado de São Paulo e sua contribuição a trabalhos atuais. In: LOPES, M.; FIGUERÔA, S. **O conhecimento geológico na América Latina**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1990.

NUCCI, O. **Turfa**. Datilografado. 1985.

OLIVEIRA, C. A. **Turfa de São José dos Campos, Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM / MME; Superintendência regional de São Paulo, 2002.

OZAWA, T. A. New method of analyzing thermogravimetric. **Buletin of Chemical Society Japan**,v.38, n.11, p.1881-1886, 1965.

PARKER, W. J. **Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications**. Washington, D.C.: National Bureau of Standards, Mar. 1982. 46p. (NBSIR 81-2427).

Q600 – TA INSTRUMENTS. **Analizador térmico simultâneo, SDT Q600**. Disponível em: <<http://www.tainstruments.com/q600/>>. Acesso em: fev. 2017.

RADIO PIRATININGA. **Grupo de pesquisadores estuda turfa em São José dos Campos**. 2016 Disponível em: <http://radiopiratininga.com.br/grupo-de-pesquisadores-estuda-turfa-em-sao-jose-dos-campos/>. Acesso em abr de 2017.

REIN, G. Smoldering combustion phenomena in science and technology. **International Review of Chemical Engineering**, v. 1, p. 3-18, Jan. 2009.

_____. **Smouldering fires and natural fuels: fire phenomena and the earth system**. New York: John Wiley & Sons, 2013.

_____. The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil. **Catena**,v.74, n.3, p.304-309, 2008.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; CALIL, F. N. **Caderno didático: proteção florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, , 2005.

SHOTYK, W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. **Earth-Science Reviews**,v.25, n.2, p.95-176, 1988.

SILVA, D. A.; BRITO J. O. **Estudo comparativo da carbonização de três origens de turfas em relação à madeira de *Eucalyptus grandis***. IPEF. N36, p.21-26, 1987.

SILVA, R. C. M.; SCHINZEL, W. **Coque de turfa e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 1982.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry fundamentals and applications**. London: Academic Press, 1993.

SMITH, D. Characterization of lactose by helium pycnometer. In: STEPHENS, K. (Ed). **The microreport: news and ideas for decision makers**. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 1996.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

STRUMINSKI, E. **Manual para curso de combate a incêndios florestais em montanha**. Disponível em: <http://www.fepam.org/arquivos/curso_combate_incendios2doc>. Acesso em: abr. 2016.

TOLEDO, L. M. A. Considerações sobre a turfa no Brasil. **Akrópolis: Revista de Ciências Humanas da UNIPAR**, v.7, n.28, p.27-41, 1999.

WAKSMAN, S. A. **The peats of New Jersey and their utilization**. New Jersey: Department of Conservation and Development, 1942.

WEBER, C. A. Über torf, humus und moor. **Abhandlungen Naturwissenschaftlichen Verein, zu Bramen**, v.17, p.465-484, 1903.

YAMAUCHI, M; KATAYAMA, S. TODOROKI, T.; WATANABE, T. Total synthesis of fulvic acid. **Journal of the Chemical Society, Chemical Communications**, v.23, p.1565-1566, 1984.

YANG, H. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, n.12/13, p.1781-1788, 2007.

YANG J.; CHEN H.; ZHAO W.; ZHOU J. Combustion kinetics and characteristics of peat by using TG: FTIR technique. **Therm anal calorim**, Nov. 2015.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Na realização das análises termogravimétricas, utilizando as amostras de solo turfoso (A1 e B1), turfa fibrosa (B e B2) e turfa fibrosa/hêmica, foram gerados gráficos pelo software TA Universal Analysis.

Amostra A1 (SOLO TURFOSO)

As Figuras A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 apresentam os resultados da termogravimetria referentes à amostra A1 de solo turfoso, variando-se as taxas de aquecimento da amostra em 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min, respectivamente.

Nos gráficos, as abscissas representam as temperaturas junto ao cadinho contendo a amostra, localizado no interior do Analisador Térmico Simultâneo, enquanto as ordenadas representam a perda de massa (%), a energia liberada ou absorvida na pirólise e combustão (W/g) ou a derivada da perda de massa com a temperatura (%/°C).

Figura A.1 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 5 °C/min.

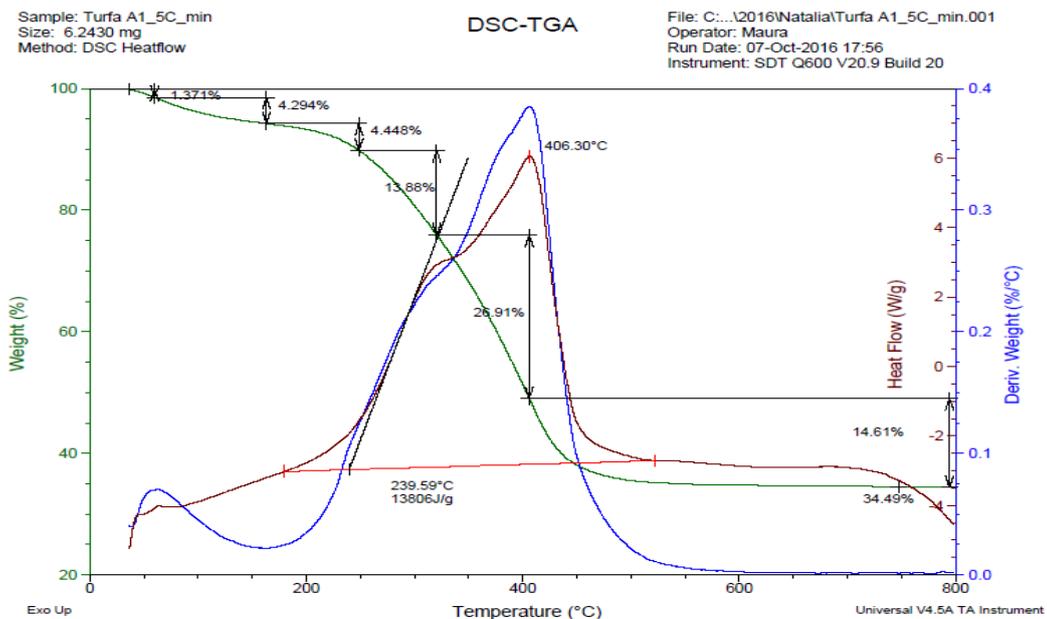


Figura A.2 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

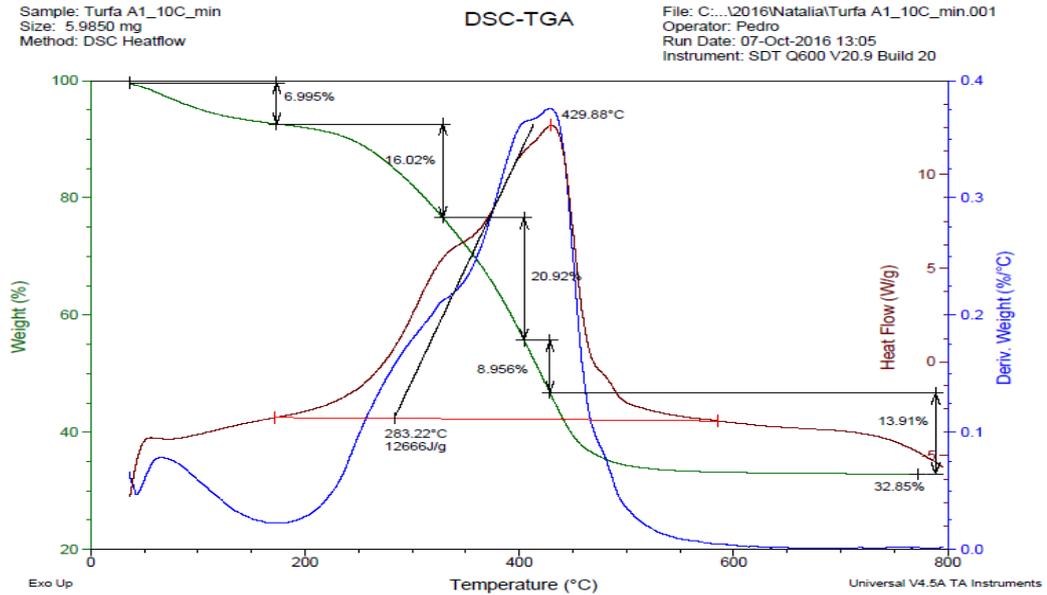


Figura A.3 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 15 °C/min.

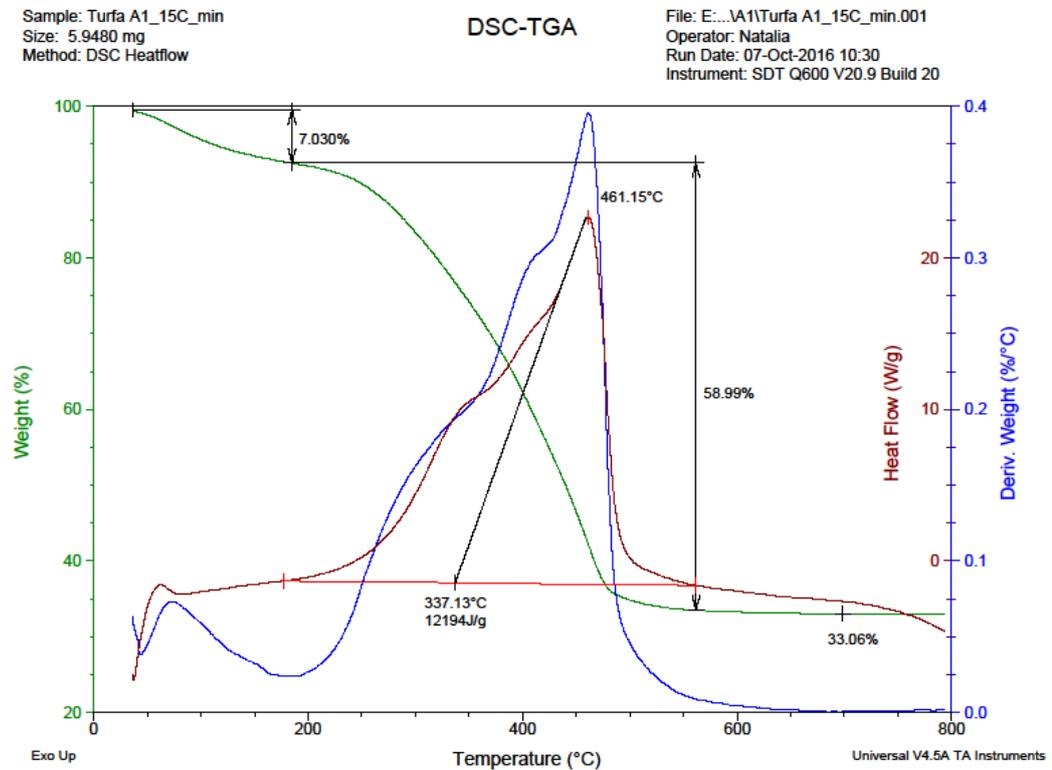


Figura A.4 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 20 °C/min.

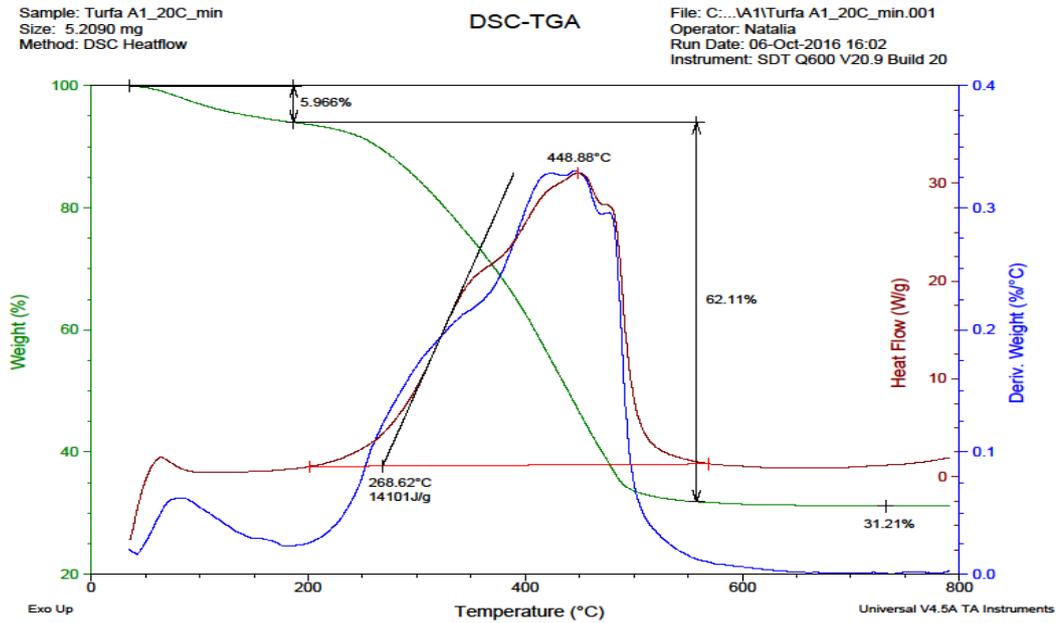
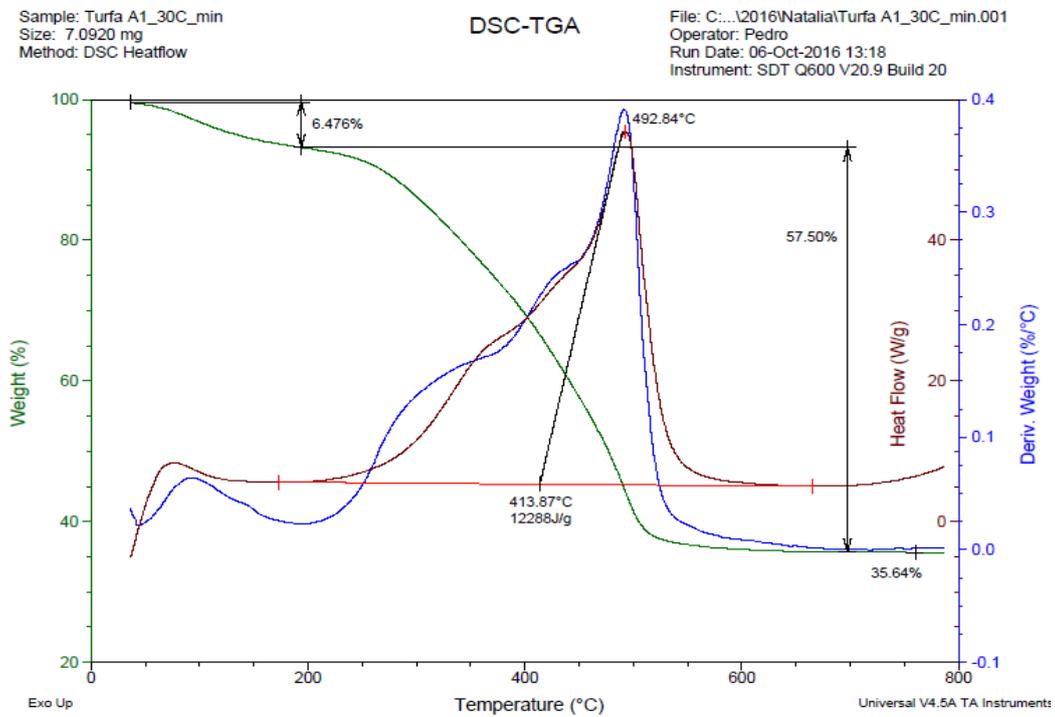


Figura A.5 – DSC – TGA da amostra A1 (solo turfoso) com taxa de aquecimento de 30 °C/min.



Nota-se pelos gráficos das Figuras A.1 a A.5, que com a estabilização da perda de massa, tem-se a presença de material não queimado para todas as taxas de aquecimento nos valores aproximados de 34,49%, 32,85%, 32,96%, 31,19% e 35,64% para V.A. de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min, respectivamente. Verifica-se ainda, que a integral abaixo das curvas de liberação de calor nos dá aproximadamente o valor do Poder Calorífico Superior (PCS) em J/g para cada caso.

AMOSTRA B1 (SOLO TURFOSO)

As Figuras A.6, A.7, A.8, A.9 e A.10 apresentam os resultados da termogravimetria referentes à amostra B1 para as taxas de aquecimento da amostra de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min, respectivamente.

Figura A.6 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min.

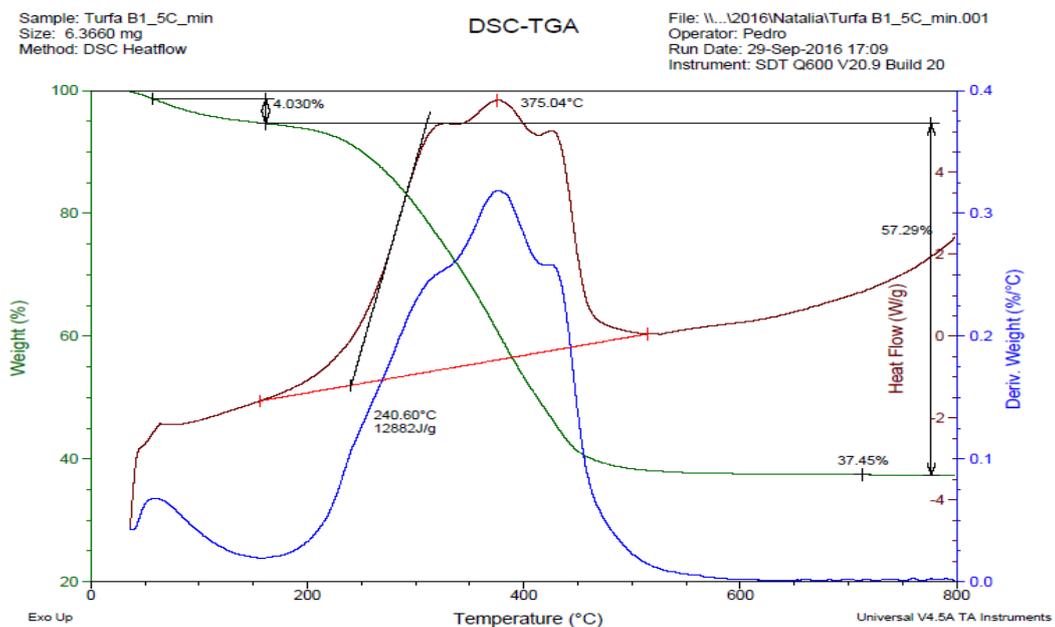


Figura A.7 – DSC-TGA para a amostra B1(solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

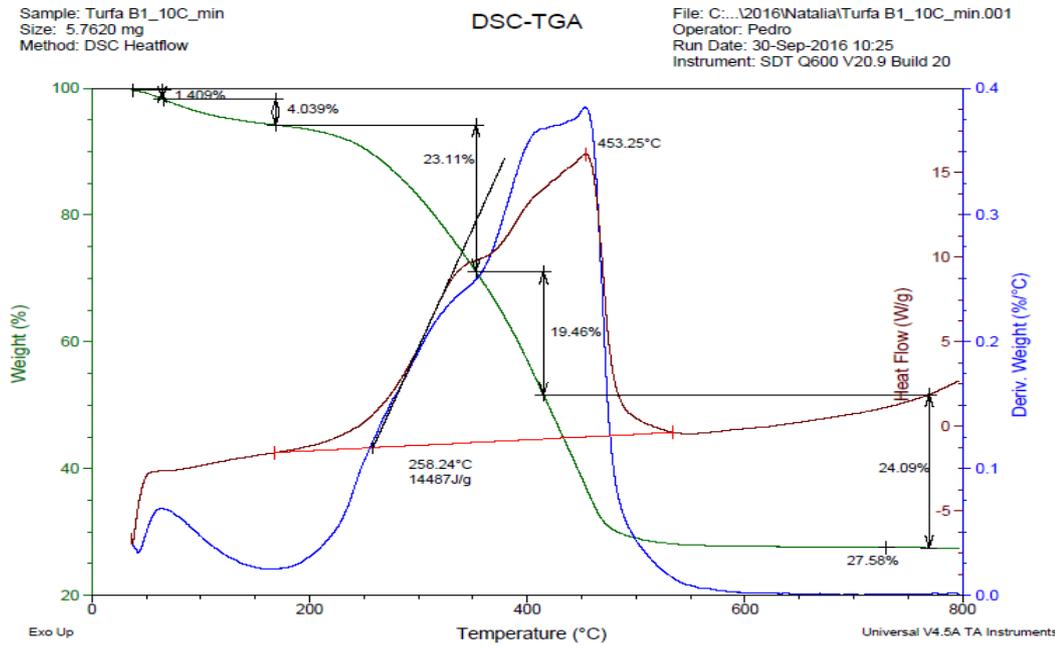


Figura A.8 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.

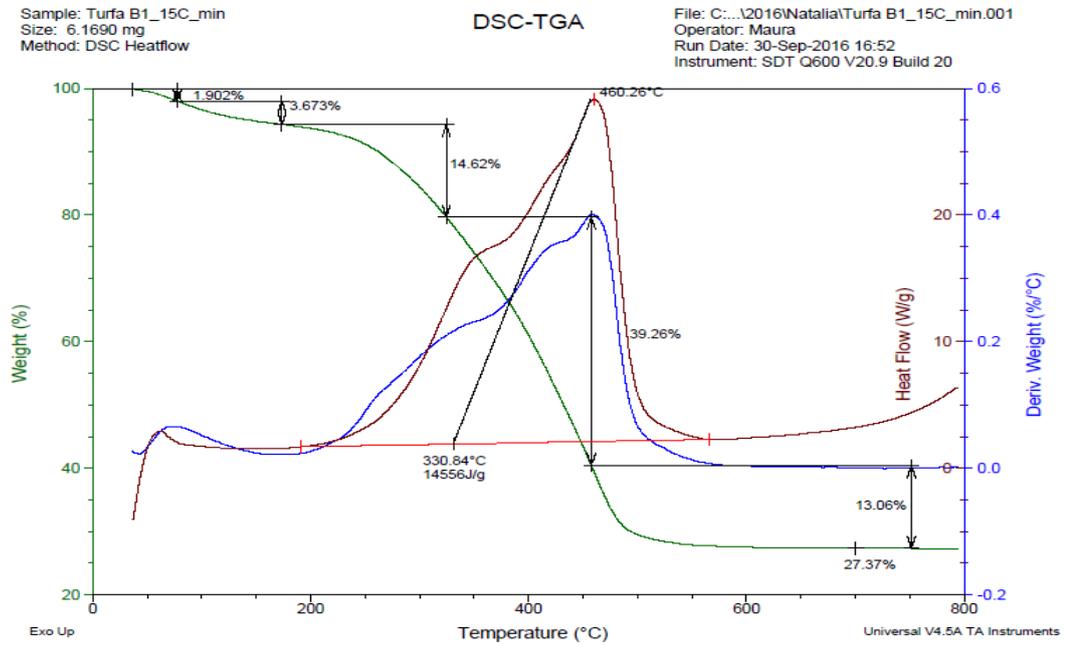


Figura A.9 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

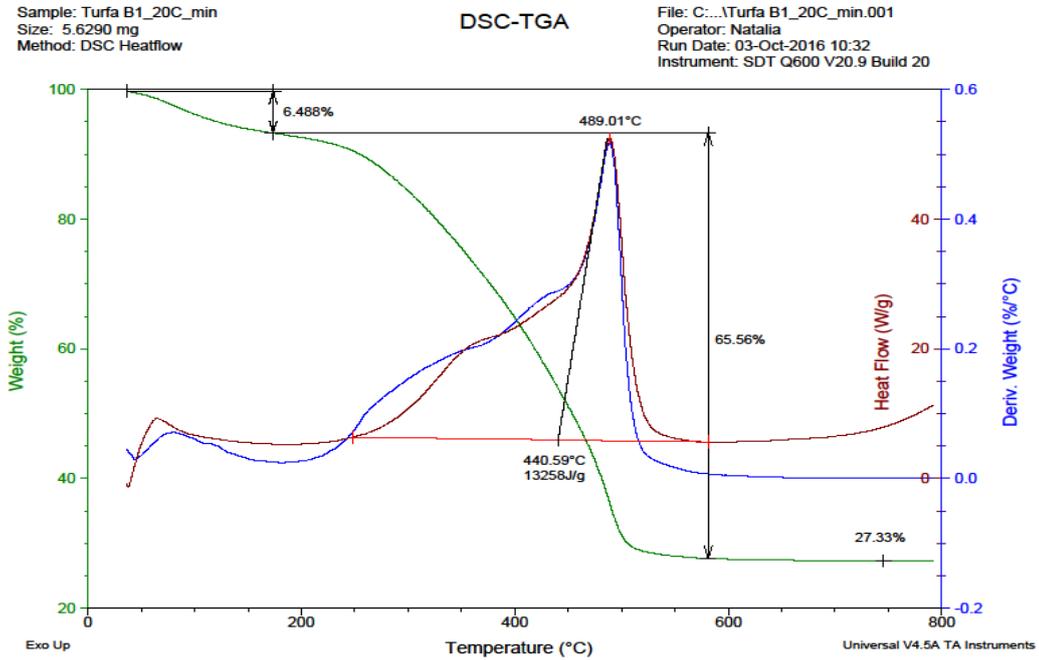
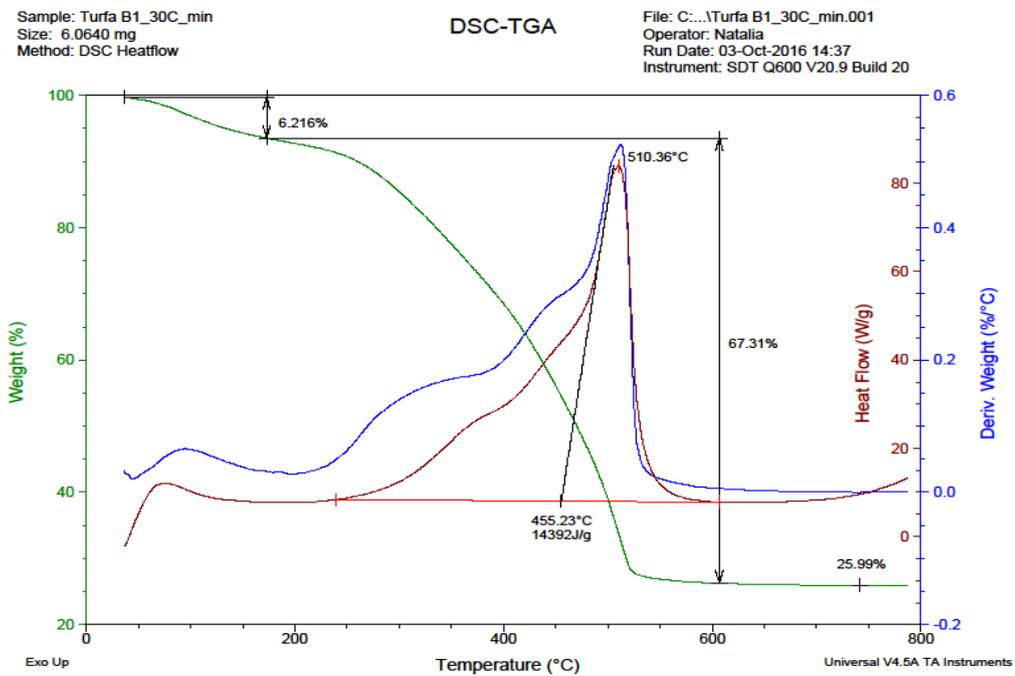


Figura A.10 – DSC-TGA para a amostra B1 (solo turfoso) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.



AMOSTRA B (TURFA FIBROSA)

Figuras A.11, A.12, A.13 e A.14 apresentam os gráficos gerados pelo *software* do Analisador Térmico Simultâneo, nas taxas de aquecimento de 5, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B. Nesta amostra não foi possível a realização do teste com a taxa de aquecimento de 10°C/min, devido a avarias no equipamento, o qual se encontra atualmente em manutenção. Ressalta-se entretanto, que a falta de dados na taxa de aquecimento de 10°C/min não interfere na avaliação dos resultados do trabalho, visto que os resultados mostram uma tendência para os gráficos de uma mesma amostra, conforme verificado para as amostras A1 e B1.

Figura A.11 – TGA-DSC para a amostra B a uma taxa de aquecimento de 5°C/min (turfa fibrosa).

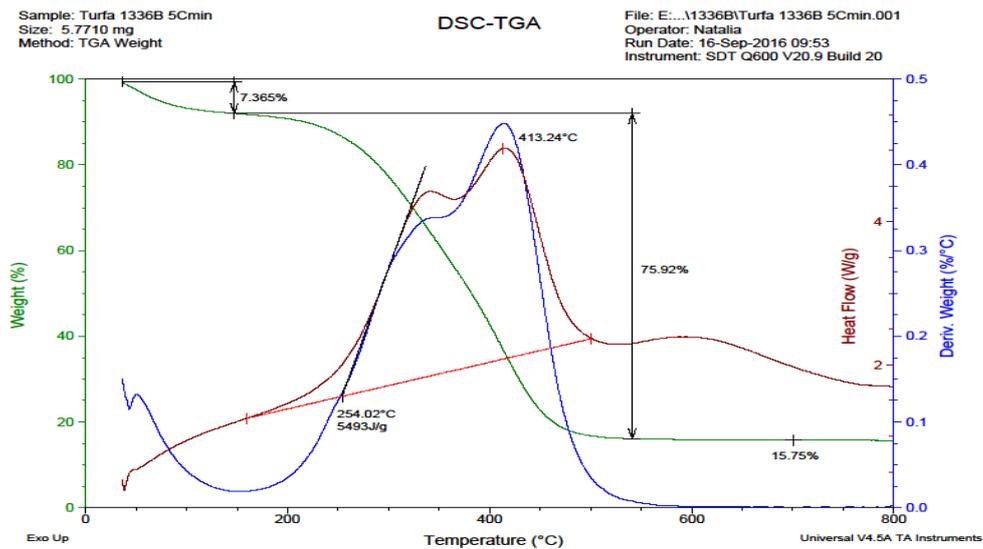


Figura A.12 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.

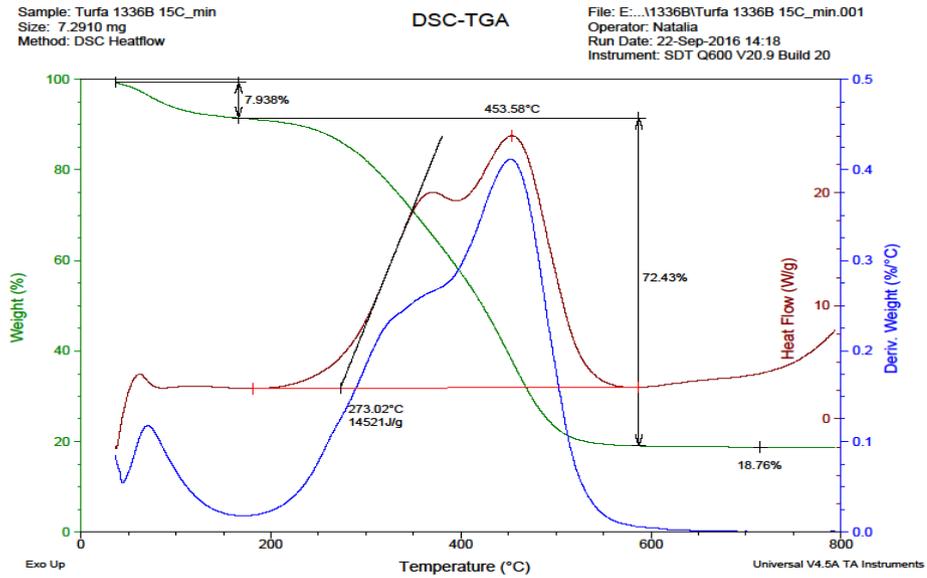


Figura A.13 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

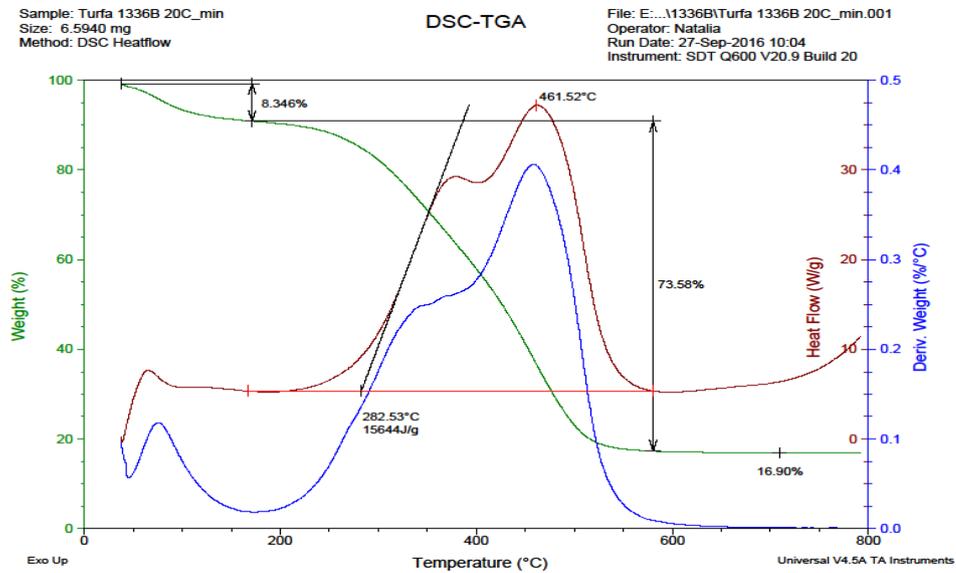
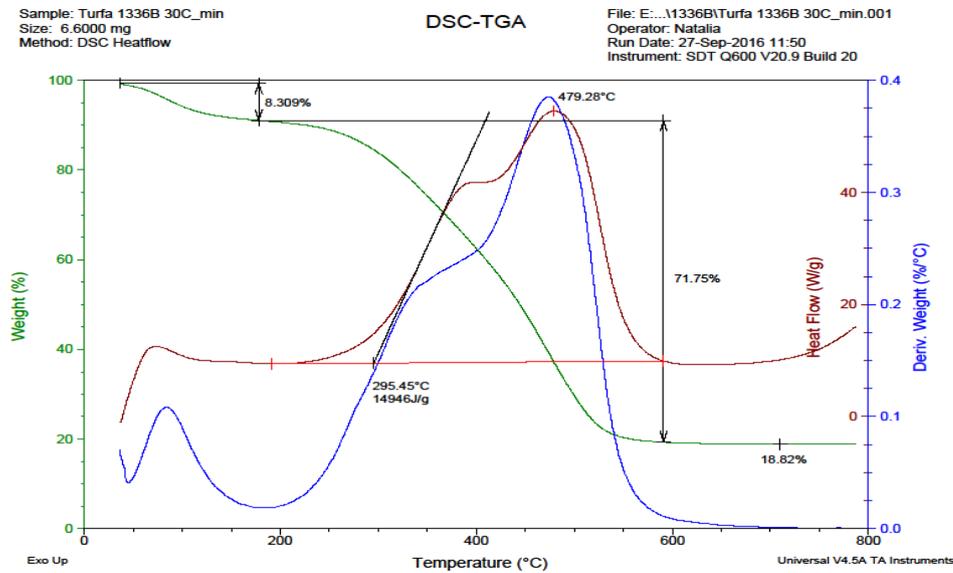


Figura A.14 – TGA-DSC para a amostra B (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.



AMOSTRA B2 (TURFA FIBROSA)

As Figuras A.15, A.16, A.17, A.18 e A.19 mostram os gráficos obtidos através do *software* do Analisador Térmico Simultâneo nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B2.

Figura A.15 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 5°C/min.

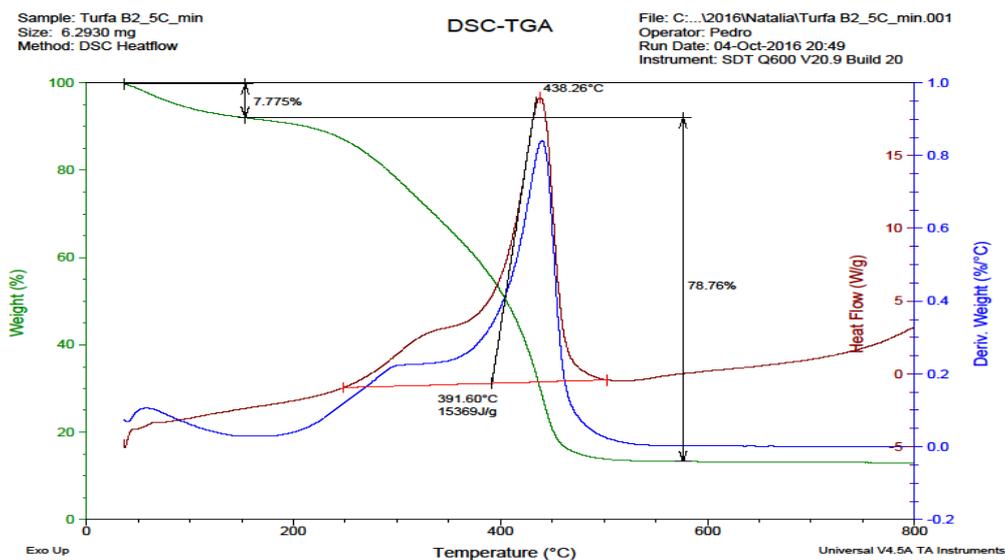


Figura A.16 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

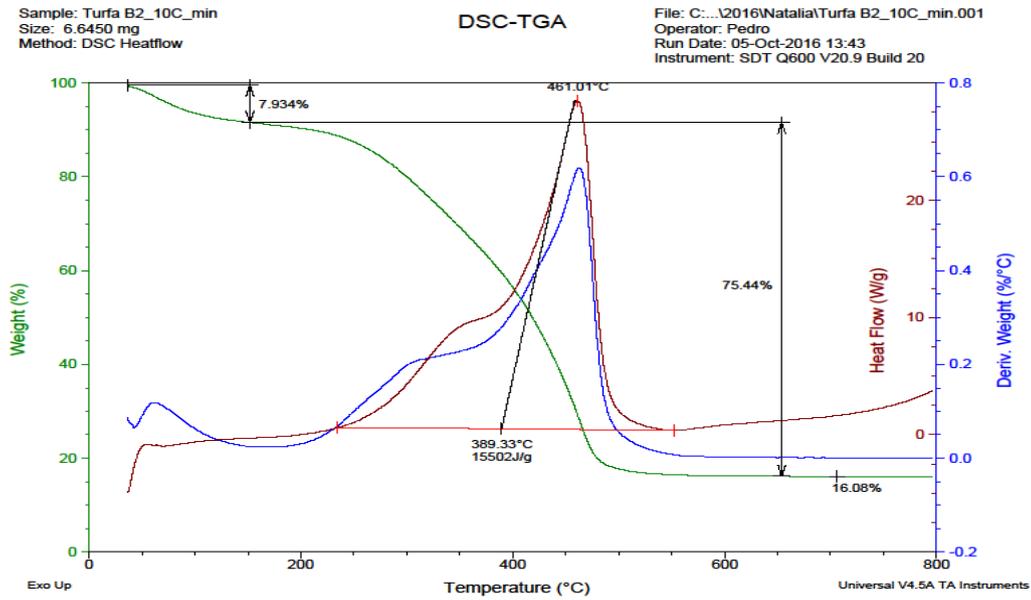


Figura A.17 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.

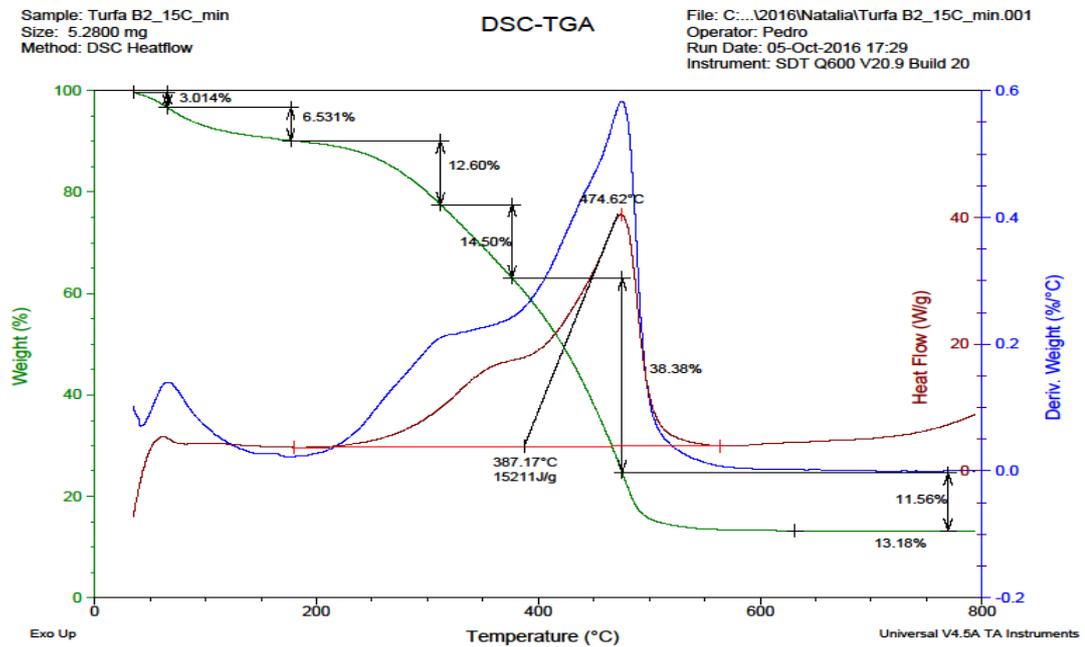


Figura A.18 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

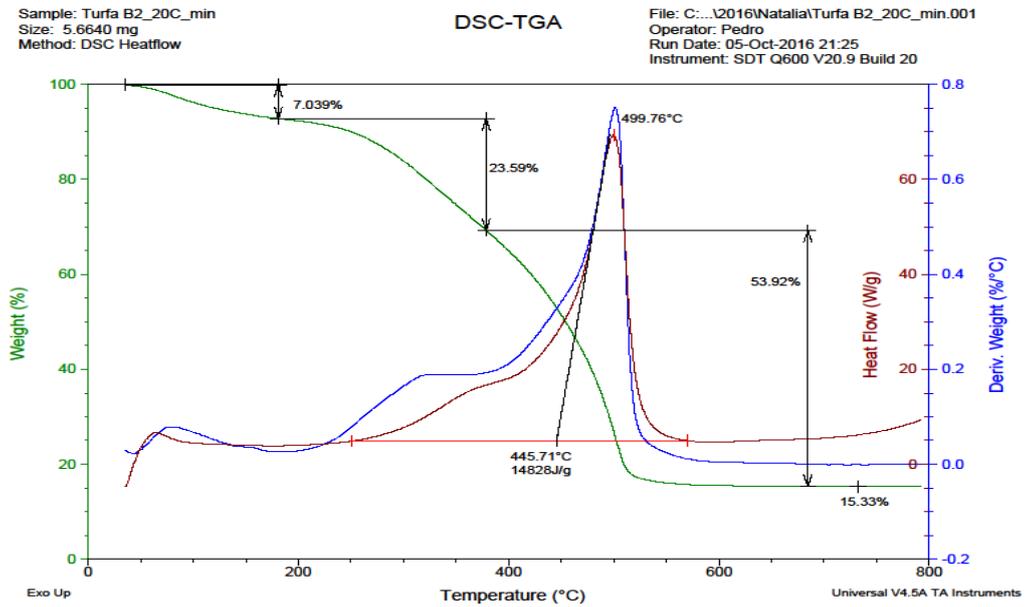
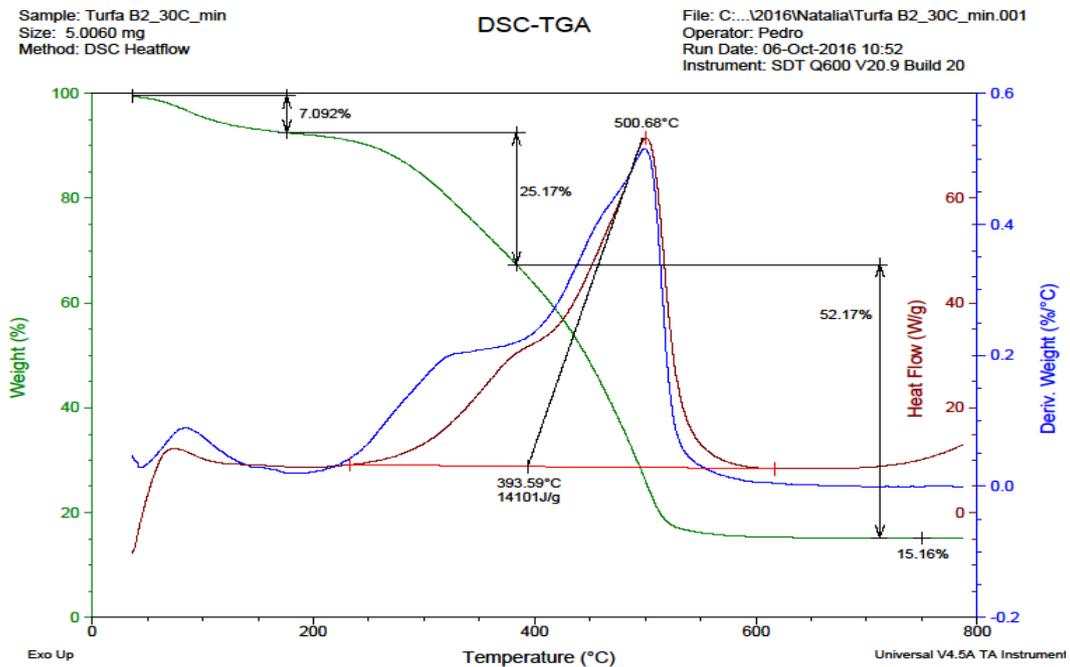


Figura A.19 – TGA-DSC para a amostra B2 (turfa fibrosa) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.



Verifica-se que a quantidade de material não queimado não variou muito ao se alterarem as velocidades de aquecimento das amostras, tendo ficado em média no valor de 14,9%, lembrando que a temperatura máxima no equipamento é de 800 °C.

AMOSTRA B5 (TURFA FIBROSA/HÊMICA)

As Figuras A.20, A.21, A.22, A.23 e A.24 mostram os gráficos gerados, referentes à perda de massa, calor liberado e derivada da perda de massa em função da temperatura para os testes realizados no Analisador Térmico Simultâneo nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15, 20 e 30 °C/min para a amostra B5.

Figura A.20 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 5°C/min.

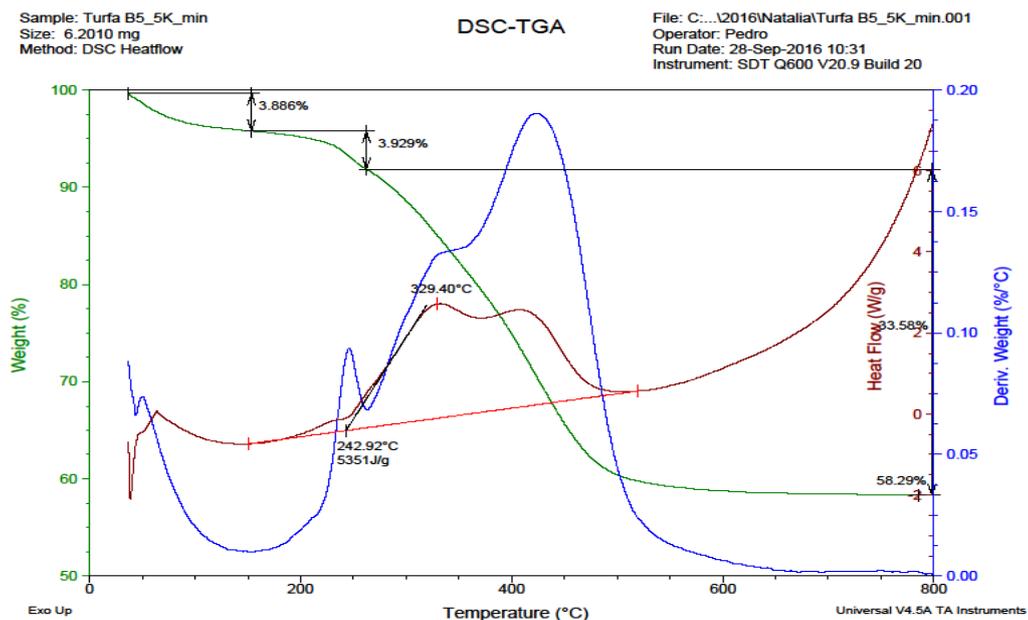


Figura A.21 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

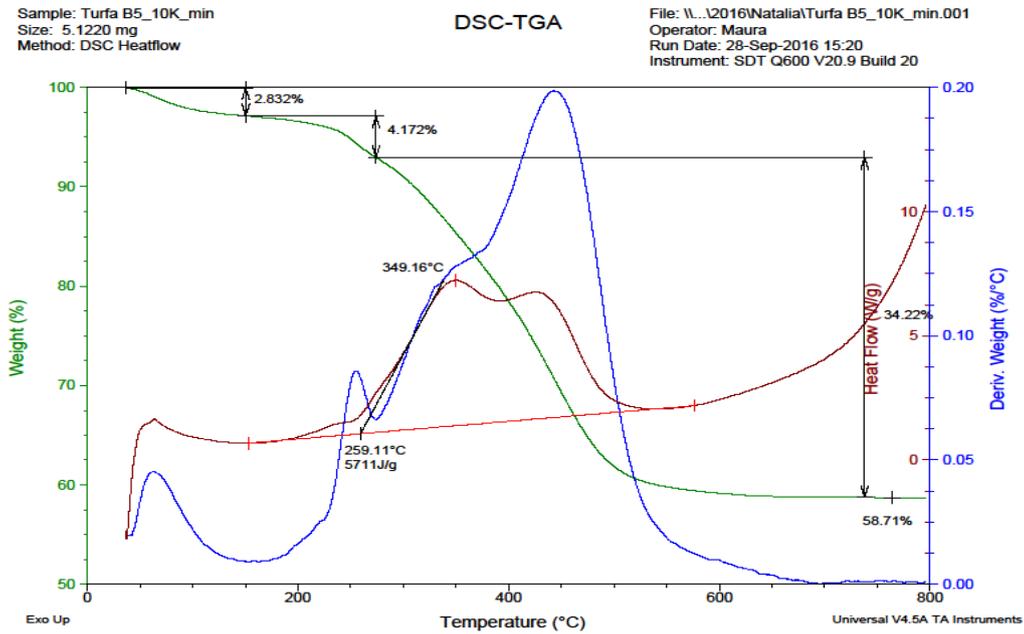


Figura A.22– TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 15°C/min.

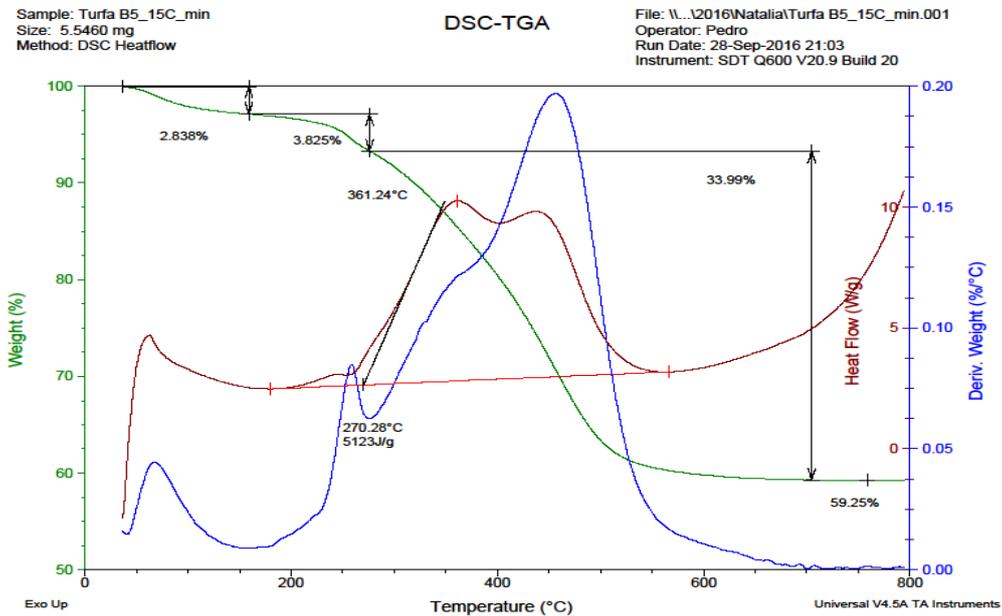


Figura A.23 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min.

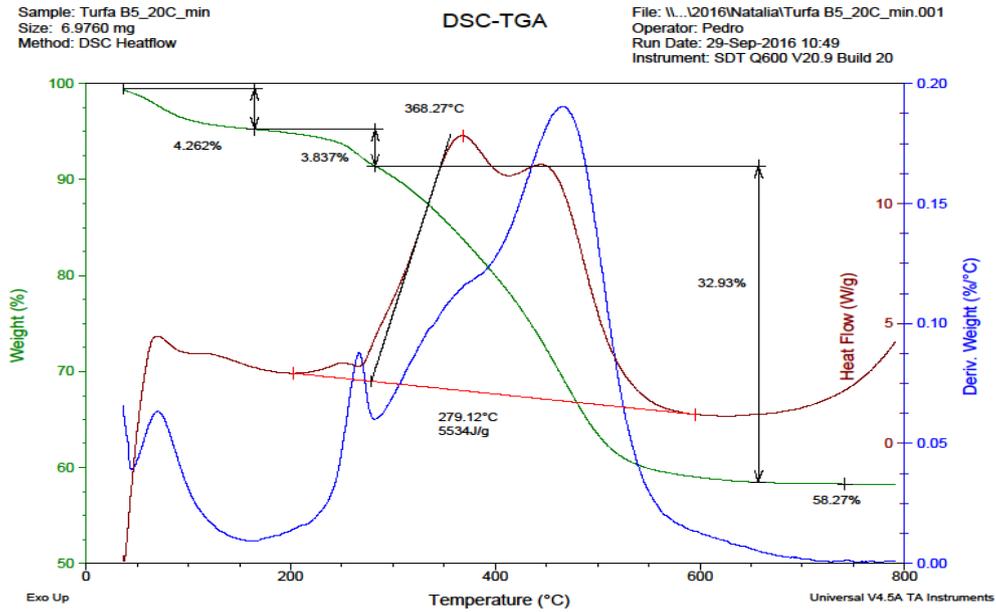


Figura A.24 – TGA-DSC para a amostra B5 (turfa fibrosa/hêmica) a uma taxa de aquecimento de 30°C/min.

