PIRÓLISE DA TURFA E ANÁLISE DO SEU CARVÃO

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ OTÁVIO BRITO

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro - 1987

S586p Silva, Dimas Agostinho da
Pirólise da turfa e análise do seu carvão.
Piracicaba, 1987.
121p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Carvão vegetal - Análise 2. Energia - Fonte alternativa 3. Turfa - Carbonização 4. Turfa em energia I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 662.74

PIRÓLISE DA TURFA E ANÁLISE DE SEU CARVÃO

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA

Aprovado em: 12/02/88

Comissão julgadora

Prof. Dr. José Otávio Brito

ESALQ/USP

Prof. Dr. Luiz Ernesto Geroge Barrichelo

ESALQ/USP

Dr. Walter Suiter Filho

CAFSB/MG

A handwritten signature in dark ink, featuring a large, stylized initial 'J' followed by a series of vertical strokes and a horizontal line extending to the right.

Prof. Dr. José Otávio Brito
Orientador

Este trabalho

Ofereço à

- meus pais: Toninho e Alacoque
- meus irmãos: Myrian, Fatinha, Célia, Célio, Mariza, Dirceu, Mônica e Toninha
- meus sobrinhos: Camila, Paula, Rodrigo, Armindinho, Eugenia e Arminda
- meus cunhados: Zé do Carmo, Miguel, Dinha, Henrique, Álvaro, Fátima e Armindo
- meus avós (in memorian): Joaquim, Antônia, Bironga e Francisca
- amizade de: família Williams Valentim, irmã Lavinha e membros do movimento focolaris
- meu recanto preferido: Madre de Deus de Minas

Dedido à Lourdes e ao Diminhas

Louvo à Deus e a Nossa Senhora Aparecida

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Otávio Brito, de maneira muito especial, pelo incentivo, apoio e orientação;
- ao Prof. Dr. Hilton Thadeu Zarate do Couto, pelo auxílio na análise estatística;
- ao Prof. Dr. Luis Ernesto George Barrichelo pela cooperação, incentivo e sugestões;
- aos colegas da Pós-Graduação em Engenharia Florestal pela convivência e incentivo;
- à Eng^a Ftal. Vera Lex Engel pela colaboração e versão do resumo para o inglês;
- aos colegas do INPA, pelo incentivo e amizade;
- às bibliotecárias Marialice M. Poggiani, Odair T. Meneghetti de Paris, Silvana M. Gregorio e Sonia C. da Rocha pela ajuda nas consultas e revisão bibliográfica;
- ao Técnico Udemilson Luis Ceribelli e Rudney Siviero pela ajuda nas análises laboratoriais;
- aos funcionários, Beatriz Regina Duarte Novaes, João Luís Duarte Novaes e Maria Regina Buch, pela colaboração e apoio;

- aos professores, funcionários e estagiários do Departamento de Ciências Florestais e do IPEF, em especial do Setor de Química, Celulose e Energia, pela convivência e auxílio;
- ao Ministério da Ciência e Tecnologia, CNPq e INPA pela oportunidade;
- à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, pela realização do curso;
- à Cerâmica Criciúma e Mineradora Conventos pela cessão de material;
- ao Prof. Dr. Carlos Celmente Cerri pela ajuda nas análises;
- ao Engº Saulo de Luca pelo apoio na coleta do material;
- à cidade de Piracicaba, pela acolhida;
- à SONAR - Serviços de Datilografia S/C Ltda., pelo serviço datilográfico;
- à todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Í N D I C E

	<u>página</u>
LISTA DE TABELA	viii
LISTA DE FIGURA	xi
RESUMO	xiii
SUMMARY	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO	6
2.1. Característica da turfa	6
2.2. Disponibilidade e formas de exploração	10
2.3. Comportamento da turfa frente ao processo de pirólise	13
2.3.1. Rendimento dos produtos	13
2.3.2. Característica do carvão	21
3. METODOLOGIA	28
3.1. Preparo e caracterização da turfa	30
3.2. Pirólise das amostras	30
3.3. Avaliação do rendimento e taxa de redução granulométrica da turfa na pirólise	32
3.4. Análises do carvão de turfa	34
3.5. Delineamento estatístico	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38

	<u>página</u>
4.1. Caracterização da turfa	38
4.2. Resultados da pirólise da turfa	39
4.3. Taxa de redução granulométrica da turfa	53
4.4. Características do carvão de turfa	59
4.4.1. Densidade e porosidade do carvão	59
4.4.2. Poder calorífico superior do carvão..	70
4.4.3. Análise imediata do carvão	78
5. CONCLUSÕES	93
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE	105

LISTA DE TABELAS

TABELA Nº		<u>página</u>
01	Discriminação de turfa baseada principalmente no grau de decomposição e na quantidade de fibras vegetais do material	9
02	Recursos identificados de determinadas turfeiras em alguns Estados brasileiros.....	12
03	Esquema de análise de variância empregado nos parâmetros determinados.....	36
04	Caracterização da turfa	39
05	Resultados médios da pirólise da turfa em rendimento gravimétrico.....	40
06	Valores de F para rendimento gravimétrico dos produtos da pirólise da turfa	41
07	Comparação das médias de rendimento gravimétrico dos produtos da turfa em função da temperatura final e taxa de aquecimento.....	43
08	Comparação de médias de rendimento gravimétrico em carvão de turfa e voláteis condensáveis em função da temperatura final e tempo de permanência	44
09	Comparação de médias de rendimento gravimétrico de carvão de turfa em função da taxa de aquecimento e tempo de permanência.....	45

TABELA Nº

página

10	Resultados médios da taxa de redução granulométrica da turfa frente à pirólise.....	54
11	Valores de F para taxa de redução granulométrica da turfa frente à pirólise	55
12	Comparação de médias para taxa de redução granulométrica da turfa frente à interação taxa de aquecimento e temperatura final.....	56
13	Resultados médios de densidade e porosidade do carvão de turfa	60
14	Valores de F para densidade e porosidade do carvão de turfa	61
15	Comparação de medidas de densidade verdadeira, densidade aparente e porosidade do carvão de turfa em função da temperatura final e taxa de aquecimento	62
16	Resultados médios do poder calorífico superior do carvão de turfa.....	71
17	Valores de F para poder calorífico superior do carvão de turfa.....	72
18	Comparação de médias do poder calorífico superior do carvão de turfa em função de cada fator testado na pirólise	73
19	Resultados médios da análise imediata do carvão de turfa	79

TABELA Nº

página

20	Valores de F para análise imediata do carvão de turfa	80
21	Comparação de médias do teor de matérias voláteis do carvão de turfa em função da temperatura final e taxa de aquecimento	84
22	Comparação de médias do teor de matérias voláteis e de cinzas do carvão de turfa em função da temperatura final e tempo de permanência	35
23	Comparação de médias de análise imediata do carvão de turfa em função da taxa de aquecimento e tempo de permanência	36

LISTA DE FIGURAS

FIGURA Nº		<u>página</u>
01	Representação esquemática do equipamento usado na pirólise da turfa.....	31
02	Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico do carvão de turfa	46
03	Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis	47
04	Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico de voláteis não condensáveis...	48
05	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na taxa de redução granulométrica da turfa	57
06	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na densidade verdadeira do carvão de turfa	63
07	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na densidade aparente do carvão de turfa	64
08	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na porosidade do carvão de turfa.....	65

FIGURA Nº

página

09	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final no poder calorífico superior do carvão de turfa	74
10	Efeito do tempo de permanência e temperatura final do poder calorífico superior do carvão de turfa	75
11	Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no teor de matérias voláteis do carvão de turfa	81
12	Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final no teor de cinzas do carvão de turfa.	82
13	Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no teor de carbono fixo do carvão de turfa.....	83

PIRÓLISE DA TURFA E ANÁLISE DO SEU CARVÃO

Autor: DIMAS AGOSTINHO DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ OTÁVIO BRITO

RESUMO

O presente trabalho objetivou o estudo do comportamento de turfa frente a pirólise, visando averiguar os efeitos da temperatura final, da taxa de aquecimento e do tempo de permanência na temperatura final no rendimento dos produtos sólidos (carvão), voláteis condensáveis e voláteis não-condensáveis e nas características do carvão obtido. Estas características foram densidade verdadeira, densidade aparente, porosidade, poder calorífico superior, teores de materiais voláteis, de cinzas, de carbono fixo e também a taxa de redução granulométrica.

Procedeu-se a pirólise da turfa em retorta elétrica de laboratório empregando as temperaturas de 300, 450, 600, 750 e 900°C, às taxas de aquecimento de 1, 3 e 5°C/minuto e tempo de permanência na temperatura final de 30 e 90 minutos.

Pelos resultados observou-se que dos fatores

testados na pirólise de turfa, a temperatura final proporcionou maior efeito na variação dos rendimentos gravimétricos dos produtos e características analisadas no seu carvão. No geral, a turfa originalmente classificada acima de 10 mm sofreu redução nessa granulometria a níveis de 40-45% após a pirólise. Quanto maior a temperatura final de pirólise, maior foi o rendimento em voláteis, densidade verdadeira, a densidade aparente, o poder calorífico superior, o teor de cinzas e o teor de carbono fixo, enquanto foi menor o rendimento gravimétrico e o teor de matérias voláteis do carvão de turfa. A porosidade do carvão de turfa foi o parâmetro que apresentou-se menos influenciado pelos fatores testados. O poder calorífico superior foi correlacionado positivamente com a produção de voláteis durante a pirólise e com o teor de carbono fixo do carvão de turfa. A obtenção do carvão de turfa é viável com possibilidades múltiplas de aplicações, da das as diferentes características obtidas.

PYROLISIS OF PEAT AND ANALYSIS OF ITS COAL

Author: DIMAS AGOSTINHO DA SILVA

Adviser: Prof. Dr. JOSÉ OTÁVIO BRITO

SUMMARY

This paper has the objective of studying the behavior of peat in face of pyrolysis, towards checking the effects of final temperature, rate of heating and time of permanence at the final temperature in the yield of solid products (coal) condensable and non-condensable volatiles, besides the characteristics of coal produced. These characteristics were: actual density, apparent density, porosity, superior calorific power, content of volatiles materials, ashes, fixed carbon and also granulometric reduction.

The pyrolysis has been made in electric muffle of laboratory, using the temperatures of 300, 450, 600, 750 and 900°C, at the heating rate of 1,3 and 5°C/minute, and time of permanence at the final temperature of 30 and 90 minutes.

By the results, it has been observed that among the factors tested in pyrolysis of peat, the final temperature had the major effect at the variation of gravimetric yield of products and characteristics analysed on its coal. Generally, the peat classified at first above 10mm has suffered a reduction on its granulometry, at levels of 40-45% after the pyrolysis. As greater the final temperature of pyrolysis, the larger the yield of volatiles, actual density, apparent density, superior calorific power, content of ashes and content of fixed carbon, while the smaller the gravimetric yield and content of volatiles materials of peat coal. The porosity of peat coal was the parameter that was less influenced by the factors tested. The superior calorific power was positively correlated with the production of volatiles during the pyrolysis, and with the content of fixed carbon of peat coal. The production of peat coal is viable with multiple possibilities of application, in face of the different characteristics obtained.

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de setenta, o mundo viu-se diante de uma grande crise energética. De um lado, uma demanda crescente de energia provocada pelo desenvolvimento industrial, aumento populacional e elevação do nível de vida e, por outro lado, o consumo de energia centrado na utilização de produtos petrolíferos. O petróleo tornou-se substancialmente caro e oligopólico, ficando inúmeros países diante de um quadro energético instável.

Tal preocupação levou e ainda tem levado vários países importadores de petróleo para a busca de novas fontes alternativas de energia, visando a atender o desejo da menor dependência dos hidrocarbonetos e da necessidade geopolítica de ter as reservas de energia em seus próprios

territórios.

O Brasil é um dos maiores países do mundo em área, com rica e abundante flora e imensas reservas hidrominerais. Isto confere ao país grande versatilidade para ajustar o uso de diversas fontes alternativas, sobressaindo entre outras: biomassa, energia solar, energia hidráulica, energia eólica, turfa, etc..

Particularmente a turfa tem despontado como promissora fonte alternativa de energia. Os estudos sobre sua possível participação no leque de fontes novas e alternativas de energia vem crescendo gradativamente.

A turfa tem excelente distribuição geográfica com ocorrência em todo território nacional. O potencial brasileiro em termos de reserva de turfa é estimado em mais de 500 milhões de toneladas equivalentes de petróleo que, comparativamente, representa o dobro da nossa reserva em gás natural e aproximadamente 70% da nossa reserva petrolífera.

Em que pese sua potencialidade, as reais condições que envolvem o uso de turfa nacional como material energético, ainda são alvo de estudos iniciais no Brasil. No

geral, as informações existentes são aquelas oriundas de outros países.

As razões que estimulam a utilização de turfa como energético, segundo SUSCZYNSKI (1982) e JAKKO POYRY ENHARIA (1983), basicamente, são: a) a turfa é um combustível fóssil doméstico de uso regional; b) é um combustível possível de utilização em grande e pequena escala, gerando uma série de benefícios sociais; c) é um combustível seguro quanto a preservação de aspectos ambientais, pois seu teor de enxofre é baixo e suas cinzas podem ser empregadas no melhoramento de solos; d) após a extração de turfa, áreas anteriormente improdutivas podem ser convertidas para agricultura e reflorestamento; e) em região com reservas abundantes de material turfáceo é a fonte energética mais econômica; f) a turfa é disponível universalmente; g) além de sua utilização em combustão direta, da turfa podem ser obtidos uma série de outros combustíveis sólidos, líquidos e gasosos.

A nação brasileira é a maior produtora e consumidora de carvão vegetal do mundo, mas cerca de 80% deste produto provém de madeira de mata nativa causando grande pressão de desmate e destruição às nossas florestas. A reposição florestal existente não é suficiente e ademais o custo de madeira de reflorestamento para produção de carvão é excessivamente alto. Daí, o carvão vegetal oriundo de flores-

tas implantadas ser de três a quatro vezes mais caro que o proveniente de mata nativa. Veja o caso do Estado de Minas Gerais, que sendo o maior consumidor de carvão vegetal do Brasil, ilustra tal situação. Segundo a Associação Brasileira de Carvão Vegetal (1986), este Estado possui uma reserva florestal correspondente a $1,245 \times 10^6$ m³ de lenha que deduzindo-se deste volume as reservas para fins legais e protectionistas e demanda para diversos usos, resta um potencial para produção de cerca de 400 milhões m³ de carvão vegetal, suficiente apenas para atender a demanda num período de aproximadamente 15 anos, mantendo a atual proporção de mata nativa e de reflorestamento na obtenção deste insumo. Acrescenta-se ainda, o fato de pesquisadores e entidades do setor florestal preverem um escasceamento progressivo de madeira, além do fato desta ter outros usos e alguns deles mais nobres.

Um fato que merece mencionar é o carvão mineral que o Brasil possui em quantidade, mas com qualidade não adequada para uso siderúrgico generalizado e com problemas de distribuição geográfica, pois as reservas exploráveis encontram-se situadas na região sul. Esta realidade leva o país a importar cerca de 80% do carvão necessário ao seu consumo, principalmente na formação de coque mineral.

Em função dos problemas existentes com a madeira e o carvão mineral, respectivamente matérias-primas para obtenção do carvão vegetal e coque mineral, acredita-se que a turfa deva ser estudada no sentido de se verificar a possibilidade do seu emprego como uma alternativa de insumo para os setores energético e metalúrgico-siderúrgico brasileiros.

Um dos estudos básicos primeiros que se deva realizar sobre a turfa, visando-se a obtenção de carvão ou coque é o estudo laboratorial da sua pirólise. Esta é a proposta geral deste trabalho cujos objetivos específicos são:

- a. caracterizar a turfa usada e determinar sua qualidade;
- b. determinar os rendimentos do processo de pirólise da turfa em relação a produção de produtos sólidos, voláteis condensáveis e voláteis não-condensáveis;
- c. além dos rendimentos, determinar as características dos produtos sólidos obtidos, com ênfase sobre as influências da temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Característica da turfa

Segundo CENCIG et alii (1983), a turfa representa a primeira etapa da série dos combustíveis fósseis na escala metamórfica: turfa, linhito, carvão mineral, antracito, sendo teoricamente o grafite o produto final.

Pelos conceitos clássicos energéticos, WILLIAMS BROTHERS ENGINEERING COMPANY (1979), PUNWANI (1980a), CONCEIÇÃO (1982) e MARTINO & KURTH (1982), conceituam a turfa como sendo um combustível sólido fóssil de idade recente ou geologicamente jovem.

Alguns autores como LEPPA (1981), HINRICKSEN (1981) e SUSCZYNSKI (1982), incluem a turfa como sendo um

perfeito composto de transição entre a biomassa e combustível fóssil natural como o carvão mineral.

Para GOODWIN (1983), a turfa também pode ser aceita como um recurso da biomassa, ou seja uma vegetação energética derivada do sol e, as turfeiras consideradas com sítios de materiais orgânicos ou florestas energéticas antigas sepultadas e degradadas.

Segundo LARBALÉTRIER (s.d.), a turfa é uma matéria esponjosa, marron ou preta, que resulta da decomposição lenta, operada em meio aquoso, de vegetais diversos e as propriedades deste material variam muito com a natureza das plantas de origem e o grau mais ou menos avançado de decomposição. Este mesmo autor afirma que a turfa é uma substância interessante, pois tem usos múltiplos e forma, por assim dizer, a transição natural entre a matéria viva e a matéria mineral.

A composição química elementar da turfa é próxima a da madeira. Segundo CHRISTIASSON (1953), PUNWANI & RADER (1978), PUNWANI (1980a) e LEPPA (1981), a turfa apresenta uma composição química elementar média em torno de 55% de carbono, 36% de oxigênio, 6% de hidrogênio, 2% de nitrogênio e menos de 0,3% de enxofre. A madeira, segundo BRITO (1978), PETROFF & DOAT (1978) e BRITO & BARRICHELO (1982), contém em média 51% de carbono, 42,5% de oxigênio, 6,5% de

hidrogênio e pequena fração de nitrogênio e enxôfre.

As propriedades e características entre turfas são muito variadas. Daí, há várias propostas de classificação de turfas. Há na literatura uma tendência de enquadrar as turfas baseando-se, principalmente, no grau de decomposição e na quantidade de fibras do material turfáceo. Assim, segundo COHEN (1983) as turfas são descritas como sendo fibrosa, hêmica e sáprica, cujas caracterizações são apresentadas na Tabela 1. Os percentuais de fibras nas turfas, de acordo com Severson et alii¹, citados por LAMASTERS et alii (1983), são: mais de 70% nas fibrosas, de 70 a 40% nas hêmicas e menos de 40% nas sápricas.

Outro método de classificar turfa também de interesse exclusivamente energético, é o proposto pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Este método, segundo PUNWAI (1980b) e KEYS (1983), reconhece duas classes: turfa combustível - em condições seca, deve possuir poder calorífico mínimo de 4400 Kcal/kg, teor de cinzas não exceder a 25%, ocorrer em depósito que em média atinja mais de 1,22 metros de profundidade e cuja área da turfeira deve situar entre 32 a 260 hectares; turfa não-combustível - quan

¹ SEVERSON, L.S.; MOOERS, H.D.; MALTERER, T.J. Inventory of of peat resorces; Koochiching Country, Minnesota. St. Paul, Department of Natural Resources, Division of Minerals, 1980.

TABELA 1. Discriminação de turfa baseada principalmente no grau de decomposição e na quantidade de fibras vegetais do material.

Fibrosa	Hêmica	Sápica
Uso agrícola	Uso agrícola/energ.	Uso energético
Teor fibras alto	Teor de fibras médio	Teor de fibras baixo
Localização: superfície	Localização: intermediária	Localização: profunda
Teor de humus: 4-23-44% (pouco decomposta)	Teor de humus: 5-23-61% (moderada decomposta)	Teor de humus: 7-2-10% (muito decomposta)
Densidade baixa	Densidade média	Densidade alta
Cinzas: teor alto	Cinzas: teor médio	Cinzas: teor baixo**
Composição elementar:		
C = 48-50%	C = 53-54%	C = 58-60%
H = 8,5-6,5%	H = 5-6%	H = 5,0-5,5%
N = 0,5-1,0%	N = 1-2%	N = 1-3%
O = 38-42%	O = 35-40%	O = 30-35%
Teor em enxofre =		
s/restrição	S = 0,1% em média	S = abaixo de 0,1%
PCS*** = baixo	PCS = médio	PCS = alto

~~Método~~ Método de Von Post, onde teor de humus vai de 1 a 10

** Para a URSS e a Finlândia não pode ser superior a 23 e 10% respectivamente

*** PCS = poder calorífico superior em kcal/kg

FONTE: SILVA (1985), adaptado.

do suas características não enquadram nas anteriores.

Para KEYS (1983), as turfas mais decompostas tendem a ter poder calorífico e densidade maiores em relação as turfas menos decompostas.

2.2. Disponibilidade e formas de exploração

As reservas de turfa ocorrem no mundo inteiro, porém segundo ANSON et alii (1981) e HINRICKSEN (1981), as maiores ocorrências de depósitos turfáceos são localizadas na faixa de florestas de coníferas da Finlândia, Suécia, Estados Unidos e na Rússia. Alguns países como Nova Zelândia, Brasil, Argentina, Uruguais e alguns dos continente africano, segundo PUNWANI (1980a), apresentam depósitos de turfa substancialmente significativos e com boas perspectivas de viabilidade energética.

Enfocando a reserva de turfa nacional, a maioria dos autores concorda que ela é suficientemente significativa e caracteriza-se pela excelente distribuição geográfica. Ela é estimada segundo MATTAR & DELAZARO (1980) e RODRIGUES (1983), em 25 milhões de metros cúbicos "in situ" enquanto SUSZYNSKI (1982) e KUMOTO et alii (1985) citando a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, apresentam uma reserva

turfácea nacional de 20,5 milhões de metros cúbicos "in situ", que em termos energéticos equivale a aproximadamente 500 milhões de toneladas equivalentes de petróleo.

Considerando os recursos e reservas energéticas globais brasileiras, segundo BRASIL-MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIAS-BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (1986), estes somavam ao final de 1985 9,6 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo, assim distribuídas: carvão mineral 62%, energia nuclear 22%, óleo de xisto 7%, energia hidráulica 3%, petróleo 3%, turfa 2% e gás natural 1%. Comparativamente, significa que em termos energéticos a reserva turfácea nacional equivale a aproximadamente 200% da reserva de gás natural e respectivamente 67% das reservas de petróleo e de energia hidráulica. Na Tabela 2, tem-se informações sobre os potenciais de determinadas turfeiras identificadas como energéticas, em alguns estados brasileiros. Todavia, nestes e nos demais estados do Brasil há turfeiras identificadas, porém não quantificadas energeticamente.

A tecnologia de exploração e processamento da turfa, é bem concebida com a redução do teor de umidade do estado natural, que é de aproximadamente 90%, para valores menores que 50% (em geral entre 15-20%), através de métodos de secagem ao ar ou artificialmente na sua própria área de depósito (FARNHAM, 1974 e PUNWANI & RADER, 1978). Baseando-

TABELA 2. Recursos identificados de determinadas turfeiras em alguns estados brasileiros.

Estado	Áreas das turfeiras (ha)	Reserva de turfa em base seca. (10 ⁶ t)	Equivalente energético (10 ⁶ tep)
Bahia	38.430	66,80	161,374
Espírito Santo	15.525	26,26	83,636
Minas Gerais	7.550	27,13	60,117
Maranhão	7.568	16,52	54,320
Rio Grande do Norte	7.000	17,02	47,273
São Paulo	4.857	14,96	32,883
Rio Grande do Sul	4.780	12,00	34,893
Alagoas	3.214	7,23	18,842
Rio de Janeiro	2.600	4,90	17,458
Paraíba	2.863	4,88	11,294
Sergipe	445	0,78	2,722
Total	96.572	204,92	541,026

FONTE: GALVÃO¹ (1986), adaptado.

¹ GALVÃO, L.A.G. (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais, Brasília). Comunicação Pessoal; 1986.

-se nisso, KUMOTO et alii (1985) e OKAGAWA (1985), citam a existência de duas técnicas distintas para extração de turfa. Pode-se, dessa forma, obter a turfa escarificada ou fre_usada (equivale a turfa a granel) e a turfa extrudada (em for_mma de tarugos). Estas são as formas de obtenção com uso mais provável no Brasil, pois requerem equipamentos simples e também dada as nossas condições climáticas de grande perío_ddo de insolação, umidade relativa do ar pouco limitante e pe_rríodo de estiagem suficiente para propiciar a extração e se_ccagem da turfa.

2.3. Comportamento da turfa frente ao processo de pirólise

2.3.1. Rendimento dos produtos

A pirólise visando a obtenção de carvão ou carbonização, é o método mais antigo de conversão de materiais como carvão mineral, turfa e madeira em produtos combustíveis e insumos diversos. A temperatura final de degradação e a taxa de aquecimento, assim como o tempo de permanência na temperatura máxima final são fatores de maior importância no processo, além da própria matéria prima que está sendo usada. Estes fatores apresentam uma grande margem de variação, o que permite obter resultados di

versos em termos de rendimento e características de produtos e subprodutos para cada situação empregada durante o processo de pirólise.

Segundo BERTHELOT & KLINDS (1943), dadas as condições do material de origem e sua composição atual, existe uma forte analogia entre a pirólise de turfa e de madeira, desde condições de temperatura, até a natureza dos produtos obtidos.

WENZL (1970), GOMES & OLIVEIRA (1980) e OLIVEIRA et alii (1982a) afirmam que a temperatura de aquecimento é uma das variáveis mais importante e controladora dos produtos obtidos da carbonização de madeira. A sua influencia nos rendimentos de carvão, líquidos e gases não condensáveis são bem conhecidas. Segundo Dupont¹, citado por RAMALHO (1943), HARRIS (1978), OLIVEIRA et alii (1982c), ALMEIDA (1983) e FARIA (1984), quanto maior a temperatura de aquecimento, maior será o grau de destilação do material, com o conseqüente aumento na quantidade de líquido e gás não condensável; em contrapartida, ocorre uma redução no rendimento do produto sólido. OLIVEIRA et alii (1982b), estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus grandis*, com idade de 6, 8 e 10 anos, à temperatura de 300, 500 e 700°C, verificaram

¹ DUPONT, G. **Distillation du bois**. Gauthier, Villars et Cie., Paris, 1924.

que as maiores taxas de redução no rendimento gravimétrico do carvão ocorre a temperatura mais baixas, havendo uma tendência de estabilização com a elevação da mesma. Segundo estes autores, o aumento da temperatura facilita a dissociação do carvão com a liberação dos gases, podendo mesmo gaseificar parte de sua estrutura sólida, acarretando um decréscimo no rendimento.

PETROFF & DOAT (1978) e OLIVEIRA et alii (1982d) mostram que o comportamento térmico da matéria prima reflete a soma das respostas térmicas de seus principais componentes: a hemicelulose é o componente menos estável e decompõe-se entre 225 e 325°C; a celulose se degrada em temperaturas mais altas, entre 325 e 375°C e produz inúmeros compostos voláteis; a lignina é o componente mais estável e se decompõe gradualmente, entre 250 e 500°C e contribui, principalmente para a formação do resíduo carbonífero.

BRITO & BARRICHELO (1977), estudando a carbonização dos componentes individuais da madeira verificaram que a lignina apresentou rendimento mais elevado em carvão, em função da mesma ser um componente de estrutura complexa e muito resistente à pirólise. Semelhantemente, PETROFF & DOAT (1978) encontraram uma correlação bastante significativa entre rendimento gravimétrico do carvão e o teor de lignina de diversas madeiras tropicais. Também, SILVA (1986)

encontrou nos endocarpos de palmáceas (babaçu e macaúba) conteúdo em lignina maior que na madeira de eucalipto. O mesmo autor, carbonizando estes materiais, observou que os endocarpos de palmáceas apresentaram maiores rendimentos em carvão e menores rendimentos em voláteis, quando comparados com a madeira de eucalipto.

Waksman & Starkley¹ citados por KIEHL (1985), afirmam que devido à ausência de quantidade suficiente de oxigênio gasoso na atmosfera (oxigênio não combinado), em consequência da saturação do material vegetal pela água onde se formam as turfeiras, não se dá a oxidação completa da matéria orgânica. A decomposição é realizada por bactérias e fungos anaeróbicos; em tais condições, constituintes como as graxas e ligninas são pouco decompostos, enquanto outros como celulose e hemicelulose são atacados lentamente.

Assim, em função da lignina o rendimento gravimétrico em carvão de turfa deve ser sensivelmente maior em relação ao carvão vegetal obtido da madeira.

LARBALETRIER (s.d.) cita a obtenção de rendimento gravimétrico de carvão de turfa variando de 34 a 54%.

¹ WAKSMAN, S.A. & STARKEY, C. The soil and microbe. N. York, John Wiley, 1949.

CHRISTIASSON (1953), TRONT (1958) e Korchunov¹ citado por FUCHSMAN (1980), submetendo a turfa à temperatura final de 500°C, obtiveram rendimento em carvão sensivelmente maior que o observado para carbonização de madeira nesta mesma temperatura. Por sua vez, SILVA & BRITO (1987) em outro estudo sobre termodegradação de turfas de três origens distintas e madeira de *Eucalyptus grandis* à temperatura final de 400-500°C e taxa de aquecimento de 50°C a cada 30 minutos, obtiveram rendimento gravimétrico em carvão em torno de 50%, mesmo descontando-se a influência do teor de cinzas como material inerte, valor este bastante superior que o obtido para a madeira. Com relação ao rendimento em voláteis condensáveis e não condensáveis, tais autores encontraram comportamento inverso ao rendimento de carvão. Segundo eles, a madeira apresenta na sua composição química original teor de matérias voláteis superior ao de turfa e que esta seria a razão para explicar o menor rendimento em voláteis por parte da turfa.

Tratando-se da pirólise de turfa, FUCHSMAN (1980) afirma que a baixas temperaturas, especialmente a 200-250°C, há rompimento de grupos carboxílicos, hemicelulose e ácidos húmicos e, no geral, em torno de 300-

¹ KORCHUNOV, V.S. Increasing of solid product yield in milled beat pyrolise. International Congress, 4., Otaniemi, Finland, 1972. *Proceedings*, 1972. p. 165-75.

-312°C ocorre quebra na estrutura de carboidratos, com produção de gases contendo principalmente água e dióxido de carbono, pequena quantidade de ácido acético e amônia e monóxido de carbono. O mesmo autor afirma que à temperatura superior a 300°C há ruptura de ligação carbono-carbono que formam os compostos inicialmente presentes na turfa, sendo a estrutura aromática dos ácidos húmicos rompidas, bem como há desarranjo na estrutura da lignina. ZHUKOV et alii (1980) explicam que a termodegradação da turfa inicia-se em 150-200°C e a principal decomposição encontra-se nas temperaturas situadas entre 300 e 500°C. Para BEL'KEVICH et alii (1971), a intensidade de decomposição da turfa aumenta, no geral, com aumento na temperatura, sendo que de 150 a 250°C, com cinco horas de processo, o grau de degradação térmica vai de 2 a 25%.

Para baixo grau de aquecimento, a produção de substâncias voláteis depende da qualidade básica da turfa e temperatura final de pirólise. CHUKANOV et alii (1962) diz que o rendimento em produtos voláteis aumenta gradualmente com aumento na temperatura a partir de 400-450°C, mas após 600°C, torna-se insignificante a variação no rendimento final deste produto. Para SHAPATINA et alii (1960), logo após a temperatura de carbonização atingir 500°C, a quantidade de produtos voláteis formados varia muito pouco. Segundo FUCHSMAN (1980), as reações associadas com a perda

de peso no material termodegradado, predominantemente, completam-se até 500°C e que, a altas temperaturas pequenas quantidades de produtos gasosos são produzidas. O mesmo autor verifica que a degradação tende a completar-se em torno de 600 a 700°C, mas entre as temperaturas de 700 e 900°C ainda pode haver eliminação de produtos voláteis, possivelmente predominando o hidrogênio.

O resíduo sólido da turfa, obtido a 300°C, segundo FUCHSMAN (1980) contém considerável quantidade de oxigênio e hidrogênio, os quais podem ser removidos a medida que aumenta a temperatura de degradação. Assim, as características de ambos os gases - condensáveis e não condensáveis, sofrem variações nos produtos que os compõem, à medida que se eleva a temperatura de degradação. Por exemplo, o mesmo autor, verifica que até aproximadamente 550°C há predominância de dióxido de carbono em relação ao monóxido de carbono na composição de voláteis voláteis não-condensáveis, mas à proporção que a temperatura de aquecimento vai sendo elevada deste patamar de 550°C, há uma situação inversa, destacando-se o monóxido de carbono sobre o dióxido de carbono na composição dos mesmos voláteis. Ainda o mesmo autor afirma que os voláteis condensáveis, basicamente, são compostos de água, alguns óleos e material semelhante ao pixe e como citado anteriormente, podem sofrer alterações em função da temperatura final em que são obtidos.

Com relação à redução volumétrica, Ekman¹, citado por FUCHSMAN (1980), afirma que a turfa ao ser degradada termicamente perde de 40-50% em volume por partícula individual. A redução volumétrica, segundo o mesmo autor, inicia-se entre 250-300°C e atinge um gradiente máximo a 400-450°C e após 500°C há pouca contração adicional.

Além da temperatura final, outro fator que merece enfoque especial: no processo pirólise, é a taxa ou velocidade de aquecimento, o que significa processo com maior ou menor duração. No geral, tratando-se de processo lento, a taxa de aquecimento na pirólise varia de 0,5 a 10°C/minuto até atingir a temperatura final. OLIVEIRA et alii (1982d), COUTINHO (1984) e VALENTE et alii (1985) carbonizando madeira em retorta elétrica de laboratório à temperatura final de 500°C, utilizaram 1,5-2,0°C/minuto como taxa média de aquecimento. SILVA (1986) carbonizando madeira de eucalipto e endocarpos de palmáceas nas temperaturas finais de 300, 500 e 700°C, partindo de uma temperatura inicial de 100°C, utilizou-se uma taxa média de aquecimento subindo 50°C a cada 30 minutos. Em pirólise de turfa, Korchunov² citado por FUCHSMAN (1980) afirma: a) o rendimento e a quali

¹ EKMAN, E. Bull. Int. Peat. Soc. 7: 39-49, 1975.

² KORCHUNOV, V.S. Increasing of solid product yield in milled peat pyrolysis. International Congress, 4., Ota-niemi, Finland, 1972. Proceedings, 1972, p. 165-75.

dade dos produtos a baixa temperatura são influenciados pela taxa de aquecimento, pois esta determina a razão em que os fragmentos de baixo peso molecular reagem e recombina para formar compostos não voláteis de alto peso molecular; b) em taxa de aquecimento maiores, os fragmentos de turfa tendem a volatilizar mais rapidamente e conseqüentemente formam menor quantidade de substâncias de alto peso molecular; c) provavelmente, as substâncias de alto peso molecular são mais estáveis e sofrem pouca volatilização e, com isso, o rendimento em carvão de turfa decresce à medida que aumenta a taxa de aquecimento.

2.3.2. Característica do carvão

Presentemente, vamos designar o termo carvão de turfa para o produto sólido obtido da sua pirólise.

Dependendo da temperatura final de pirólise e de algumas características do produto residual, há uma tendência de chamar o carvão de turfa de semi-coque ou coque. Para FUCHSMAN (1980), semi-coque caracterizaria o produto sólido obtido em torno de 450°C, enquanto coque seria referente ao produto conseguido, via de regra, à maiores temperaturas. Já, segundo LARBALÉTRIER (s.d.), coque e carvão são sinônimos quando se trata de pirólise de turfa.

No que tange às propriedades e características do carvão, elas estão intimamente ligadas aos fatores do processo de produção que lhe deu origem. Assim, MENDES et alii (1982) afirmam que estes fatores e o seu controle são de grande utilidade na fabricação e escolha do carvão para ser usado para diferentes fins.

No caso da densidade, sua determinação é importante na caracterização do carvão, pois outras propriedades estão intimamente a ela relacionadas como por exemplo resistência físico-mecânica, porosidade e quantidade de energia por unidade de volume.

Usualmente a densidade de materiais como carvão é determinada com esse produto submetido a duas condições distintas: a) carvão reduzido a pó, onde se pretende medir a densidade da "substância carvão" e que fornece a chamada densidade verdadeira; b. carvão em pedaços, incluindo neste caso, sua porosidade e, que resulta na denominada densidade aparente.

MENDES et alii (1982) verificaram que a densidade e porosidade do carvão são fortemente influenciadas pela densidade do material de origem, pela temperatura final e taxa de aquecimento.

A maioria dos autores concorda que a densidade do carvão está intimamente ligada à densidade da matéria

prima que lhe deu origem. Estudando a pirólise de madeira, PETROFF & DOAT (1978), OLIVEIRA & ALMEIDA (1980) e BRITO & BARRICHELO (1982) encontraram correlação altamente significativa entre a densidade da matéria prima e a densidade do carvão obtido.

SILVA & BRITO (1987), verificaram que o carvão de turfa é mais denso e menos poroso em relação ao carvão de madeira de *Eucalyptus grandis* e a razão para tal é a turfa originalmente ter apresentado maior densidade em relação a madeira.

A taxa de aquecimento pode influenciar a densidade do carvão. EARL (1975) e MENDES et alii (1982) afirmam que o carvão oriundo de uma pirólise lenta tende a ser mais denso que o obtido no processo mais rápido. Estes autores comentam que a pirólise rápida de madeira não produz carvão com boas propriedades físicas, notadamente para fins siderúrgicos.

Quanto à temperatura final de degradação, esta tem efeito peculiar na densidade do carvão, não havendo ainda uma disponibilidade de informações totalmente conclusivas a respeito. Estudando a pirólise da madeira de *Prunus serotina* em várias temperaturas, Blankenhorn¹ et alii

¹ BLANKENHORN, P.R. et alii. Porosity and pore distribution of blackcherry carbonized in an inert atmosphere. *Wood Science*. Madison, 11(11): 23-9, July, 1978.

citados por OLIVEIRA et alii (1982c), verificaram uma tendência da densidade aparente decrescer até por volta de 600°C e então aumentar até 900°C , enquanto a densidade verdadeira aumentou de 300 para 500°C e permaneceu mais ou menos constante entre 500 e 900°C . Já WENZL (1970) revela que a densidade verdadeira deve aumentar e a densidade aparente decrescer com o aumento na temperatura final de degradação. Segundo OLIVEIRA et alii (1982d), quanto maior for a temperatura de degradação, maior será o volume de poros do carvão, em decorrência da expulsão dos gases, provocando uma diminuição da densidade aparente. Os mesmos autores mencionam que a densidade verdadeira aumenta sistematicamente com aumento na temperatura, pois acontecem rearranjos nas cadeias de carbono à medida que há elevação da temperatura, ocorrendo diminuição na distância entre átomos de carbono.

A porosidade está ligada à densidade aparente e indica o conteúdo de vazios no produto carbonoso resultante da termodegradação. Conforme já discutido anteriormente, o aumento na temperatura provoca expulsão dos gases, deixando vazios ou poros no interior do carvão.

Conforme afirma TROSSERO (1981) o teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão está em função direta da temperatura final de degradação. Todavia, MEN

DES et alii (1982) trabalhando com termodegradação de madeiras às temperaturas de 300, 500 e 700°C, verificaram que o poder calorífico do carvão obtido foi maior à temperatura de 500°C. Segundo os mesmos autores, o aumento do poder calorífico do carvão produzido a 500°C é explicado em função da sua composição química elementar, pois observa-se que o teor de oxigênio cai sensivelmente quando se passa de 300 para 500°C. De maneira mais ou menos semelhante, COUTINHO (1984) observou que o poder calorífico aumenta apenas com a elevação da temperatura na faixa de 400 a 600°C, mantendo-se constante a temperaturas superiores.

Num trabalho relativo a temperatura final de degradação de turfa e o rendimento do resíduo sólido, Keppeleler e Holfmann¹ citados por FUCHSMAN (1980) utilizaram as temperaturas finais de 450 a 550°C e turfa com teor de umidade de 7,6%. Eles obtiveram 57,10% de produto sólido contendo 28,15% de voláteis e poder calorífico de 6932 kcal/kg à 450°C e a 550°C; o rendimento foi de 43,50% tendo o conteúdo de voláteis de 17,50% e o poder calorífico de 7191 kcal/kg. Assim, depreende-se um comportamento similar da turfa em relação à madeira frente o processo de termodegradação, quando se trata de rendimento, composição química e poder calorífico do produto carbonoso.

¹ KEPPELER, G. & HOLFFMANN, H. *Brennstoff Chemie*, 13:401-6, 1932.

Vários autores, WENZL (1970), EARL (1975) e FARIA (1984), JUVILLAR (1980), MENDES et alii (1982), OLIVEIRA et alii (1982b) e OLIVEIRA et alii (1982d), trabalhando com diversas madeiras, mostram que há aumento do teor de carbono fixo à medida que aumenta a temperatura de degradação. Segundo estes autores, o aumento do teor de carbono ocorre devido à liberação de compostos voláteis, condensáveis e não condensáveis, durante a termodegradação, formados principalmente por monóxidos de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves. Assim, o teor de carbono fixo no produto residual tende a aumentar, à medida que tais compostos são eliminados. Entretanto, para COUTINHO (1984) o teor de carbono fixo aumenta de forma acentuada com o aumento da temperatura na faixa de 400 a 700°C e se mantém constante em temperaturas de degradação superiores.

CHUKANOV et alii (1962), WENZL (1970), EARL (1975), MENDES et alii (1982), OLIVEIRA et alii (1982d) e ALMEIDA (1983), afirmam que a elevação de temperatura provoca expansão dos gases, expulsando-os do interior do carvão, o que vem determinar um menor teor de voláteis no produto final. A maioria destes autores observa que há uma correlação inversa entre a temperatura final do processo e o teor de matérias voláteis do produto final.

Na literatura, não encontrou-se registro referente aos efeitos das condições de termodegradação de turfa

no teor de cinzas. Entretanto, na termodegradação da madeira, o teor de cinzas do carvão é motivo de controvérsia. Estudando a composição química do carvão de espécie florestal nativa, FARIA (1984) verificou que o teor de cinzas aumentou com a elevação da temperatura final. Em contra partida, HARRIS (1980) afirma que a temperatura final de degradação não tem influência alguma sobre o conteúdo de cinzas. Para estas divergências encontradas, OLIVEIRA et alii (1982a) afirmam que elas podem ser acreditadas às características de cada matéria prima utilizada na termodegradação. FUCHSMAN (1980) menciona que o teor de cinzas no produto residual vai depender do teor originalmente na turfa e das condições empregadas no processo.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido no Setor de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais, pertencente a Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo.

Foi utilizada turfa procedente da Fazenda Vitória, situada no município de Araranguá, sul do Estado de Santa Catarina. A turfeira pertence a empresa COMINAS - Mineradora Conventos S.A. do grupo CRECISA - Cerâmica Criciúma S.A.. As amostras de turfas foram retiradas de 6 pontos equidistantemente distribuídos à distâncias médias de 700 m em uma área piloto de 60 hectares, inserida numa turfeira de aproximadamente 2.000 hectares e com profundidade média de 2 a 2,5 metros. Sobre a turfeira predominava vegetação ras-

teira, especialmente gramíneas, havendo também pequena faixa central com cobertura florestal. Escolheu-se esta origem de turfa por haver informações prévias quanto ao seu teor de enxofre que é relativamente baixo, grau de decomposição bastante avançado, facilidade de obtenção e trabalhos pioneiros da empresa na área. Estas condições são importantes para o fim proposto no trabalho, principalmente quanto as propriedades e características dos produtos obtidos no processo de pirólise.

A turfa na forma a granel com 70% do seu volume situada entre 10 e 30 mm foi coletada individualmente em cada ponto através do trado manual num perfil de 0,5 a 2,5 metros, a contar da superfície da turfeira. As amostras coletadas foram misturadas perfazendo uma amostra final com volume equivalente a 200 litros.

3.1. Preparo e caracterização da turfa

A turfa na forma a granel foi inicialmente seca ao ar livre, homogeneizada e posteriormente seca em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$. Portanto, o material foi utilizado absolutamente isento de umidade.

A caracterização da turfa foi efetuada através da determinação dos teores de matéria voláteis, de cinzas e de carbono fixo, densidade, porosidade, poder calorífico superior, cujos métodos de determinação foram os mesmos empregados na análise do carvão. Ainda foi determinado o teor de carbono orgânico total da turfa utilizando-se o seguinte procedimento: amostra absolutamente seca com dimensões inferiores a 100 mesh, de peso conhecido, foi incinerada a 1.100°C e o gás produzido (CO_2) foi analisado através do aparelho Carmograph 12A. O resultado foi expresso diretamente em porcentagem de carbono. As análises do teor de carbono orgânico foi realizada no Departamento de Solos do Centro de Energia Nuclear na Agricultura.

3.1. Pirólise das amostras

Para cada ensaio utilizaram-se 400 g de material. Os ensaios foram realizados em retortas (muflas) elétricas devidamente equipadas para proceder a coleta das frações sólidas e líquida do processo, cujas temperaturas foram controladas por pirômetros previamente calibrados. Uma representação esquemática do equipamento utilizado na pirólise da turfa é mostrada na Figura 1.

FIGURA 1. Representação esquemática do equipamento usado na termodegradação da turfa.

Do volume inicial de 200 litros foram obtidas ao acaso, subamostras individuais de turfa que foram submetidas ao aquecimento, às temperaturas finais de 300, 450, 600, 750 e 900°C, a partir de uma temperatura inicial de 100°C. As taxas médias de aquecimento na pirólise foram de 1, 3 e 5°C por minuto, que caracterizam três taxas bem distintas e assemelham-se às aquelas já usadas para madeiras e mesmo para turfas em trabalhos a níveis laboratoriais, conforme já citado anteriormente. Foram testados, também, dois tempos de permanência às temperaturas finais do processo, ou seja de 30 e de 90 minutos. Para cada tratamento houve 2 (duas) repetições, perfazendo assim, um total de 60 ensaios.

Após cada ensaio, o aparelho foi resfriado até aproximadamente 50°C, procedendo-se, então, a retirada e pesagem dos produtos sólidos (carvão) e voláteis condensáveis. Os voláteis não condensáveis foram eliminados durante o processo.

3.3. Avaliação do rendimento e taxa de redução granulométrica da turfa na pirólise

Foram avaliados para cada pirólise os rendimentos gravimétricos percentuais de carvão, voláteis condensáveis com base no peso seco da turfa submetida a

ação da pirólise. O cálculo foi feito para cada repetição utilizando a seguinte equação:

$$R = \frac{PP}{PMS} \times 100 \dots\dots\dots (equação 1)$$

onde,

R = rendimento gravimétrico do produto sólido (carvão) ou volátil condensável (%);

PP = peso do produto sólido (carvão) seco ou do volátil condensável (g);

PMS = peso da matéria seca (g).

O rendimento em voláteis não condensáveis, foi obtido pela diferença dos rendimentos gravimétricos dos produtos sólidos e voláteis condensáveis, de um total de 100%.

Tanto na turfa original, como no seu carvão utilizando-se uma peneira de 10 mm de abertura, determinou-se a fração que ficou retida na mesma, utilizando-se a seguinte equação:

$$Q = \frac{PFR}{PTC} \times 100 \dots\dots\dots (equação 2)$$

onde,

Q = quantidade de turfa ou de carvão de turfa superior a 10 mm (%);

PFR = peso da fração retida na peneira de 10 mm de abertura (g);

PTC = peso do material (turfa ou carvão de turfa) usado na determinação (g).

Para determinar a taxa de redução granulométrica ocorrida na termodegradação da turfa, aplicou-se os valores obtidos na equação 2 a seguir:

$$RG = \frac{QT - QC}{QT} \times 100 \quad \text{..... (equação 3)}$$

onde,

RG = taxa de redução granulométrica (%);

QT = quantidade de turfa superior a 10 mm (%).

QC = quantidade de carvão de turfa superior a 10 mm (%).

3.4. Análises do carvão de turfa

- a. densidade verdadeira - obtida utilizando o método do picnômetro, citado por OLIVEIRA et alii (1982b), e expressa em g/cm³.
- b. densidade aparente - obtida empregando-se o método da balança hidrostática, segundo a mesma usualmente empregada para madeiras propostas pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (M 14/74) expressa em kg/m³;

- c. porosidade - foi estimada a partir da densidade aparente e da densidade verdadeira do carvão. A equação empregada foi:

$$\text{Posidade (\%)} = \left(1 - \frac{\text{densidade aparente}}{\text{densidade verdadeira}} \right) \times 100 \quad \text{.. (equação 4)}$$

- d. poder calorífico superior - foi determinado pelo método da bomba calorimétrica, seguindo a norma NBR 8633 da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- e. análise imediata - foram obtidos os teores de matérias voláteis, de cinzas e de carbono fixo através da norma NBR 8112 da ABNT.

3.5. Delineamento estatístico

Para análise estatística dos resultados da termodegradação da turfa, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com tratamentos fatoriais tendo duas repetições por tratamento. Utilizaram-se 30 tratamentos discriminados nos fatores: 5 temperaturas finais, 3 taxas de aquecimento e 2 tempos de permanência às temperaturas finais. A Tabela 3 apresenta o esquema de análise de variância empregado neste estudo.

TABELA 3. Esquema de análise de variância empregado nos parâmetros determinados.

Causa da variação	Grau de liberdade
Temperatura final (A)	4
Taxa de aquecimento (B)	2
Tempo de permanência (C)	1
Interação A x B	8
Interação A x C	4
Interação B x C	2
Interação A x B x C	8
(Tratamentos)	29
Resíduo	30
Total	59

Após a análise de variância, procedeu-se o teste de comparação de médias por fatores e também para as interações ocorridas entre eles, utilizando o teste de Waller-Duncan. O nível de significância deste teste segue o mesmo dado por F na análise de variância.

De forma complementar e para auxiliar a discussão dos dados foram determinadas correlações estatísticas entre alguns parâmetros analisados no carvão de turfa utilizando-se de todos os resultados individuais de cada tratamento. No caso foram analisados os coeficientes de correlação.

Para os dados em porcentagem, cujo coeficiente de variação foi alto (acima de 20%), procedeu-se a transformação dos dados para arc seno $\sqrt{x/100}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da turfa

As características da turfa são apresentadas na Tabela 4.

Verifica-se que este material enquadra-se como turfa energética, conforme proposta de classificação do Departamento de Energia dos Estados Unidos apresentada por PUNWANI (1980b) e KEYS (1983) já citada na revisão de literatura.

Com base em COHEN (1983) e SILVA (1985) deduz-se que a turfa usada pode também ser classificada entre hêmica e sáprica, portanto com maior grau de decomposição e menor teor de fibras que também implica em material destinado para fins energéticos.

TABELA 4. Caracterização da turfa.

Parâmetros	Número de repet.	Médias	Coefficiente de variação (%)
Densidade verdadeira (g/cm ³)	10	1,61	3,37
Densidade aparente (kg/m ³)	10	370,00	9,45
Porosidade (%)	10	76,98	3,58
Poder calorífico superior (kcal/kg)	5	4987,80	4,08
Teor matérias voláteis (%)	5	52,92	1,48
Teor de cinzas (%)	5	20,89	5,28
Teor de carbono fixo (%)	5	26,18	2,81
Teor de carbono total (%)	3	32,97	2,58

4.2. Resultados da pirólise da turfa

A Tabela 5 apresenta globalmente os resultados médios desses rendimentos, enquanto a Tabela 6 apresenta os resultados globais dos valores de F das análises de va-

TABELA 5. Resultados médios da pirólise da turfa em rendimento gravimétrico¹.

Tempe- ratura final (°C)	Taxa de aqueci- mento (°C/min)	Tempo de permanên- cia (min)	Rendimento gravimétrico (%)		
			Carvão turfa	Voláteis condensáveis	Voláteis não condensáveis
300	1	30	90,91	4,26	4,83
300	1	90	85,32	7,56	7,12
300	3	30	89,97	6,54	3,49
300	3	90	85,95	7,89	6,16
300	5	30	85,27	6,82	7,90
300	5	90	83,37	8,51	8,12
450	1	30	65,27	17,03	17,69
450	1	90	60,53	20,61	18,86
450	3	30	63,21	19,26	17,52
450	3	90	60,40	21,11	18,49
450	5	30	68,86	18,39	18,75
450	5	90	60,97	22,35	16,68
600	1	30	51,14	23,68	25,18
600	1	90	50,90	23,94	25,16
600	3	30	51,91	23,58	24,51
600	3	90	51,65	24,16	24,09
600	5	30	52,61	22,99	24,40
600	5	90	51,65	23,51	24,84
750	1	30	49,13	27,26	23,61
750	1	90	48,11	26,30	25,59
750	3	30	47,23	25,97	26,80
750	3	90	46,17	27,64	26,19
750	5	30	47,18	25,64	27,17
750	5	90	47,21	24,48	28,31
900	1	30	44,96	27,42	27,62
900	1	90	45,37	26,27	28,35
900	3	30	45,71	23,13	31,16
900	3	90	45,68	24,24	30,08
900	5	30	45,68	21,51	32,81
900	5	90	45,40	21,11	33,49

¹ Médias de duas repetições.

riância desses resultados. Convém mencionar que os resultados individuais obtidos bem como suas análises de variância são apresentados nas Tabelas de 24 a 27 do Apêndice.

TABELA 6. Valores de F para rendimento gravimétrico dos produtos da pirólise da turfa

Causa de variação	Carvão turfa	Voláteis condensav.	Voláteis não condensáveis
Temperatura final (A)	9431,05**	2046,17**	1703,27**
Taxa de aquecimento (B)	12,36**	14,27**	29,18**
Tempo de permanência (C)	107,71**	50,14**	6,87*
Interação A x B	14,28**	26,17**	11,71**
Interação A x C	24,92**	18,61**	2,66ns
Interação B x C	5,19*	0,59ns	2,89ns
Coefficiente de variação (%)	1,03	2,94	2,76

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Quando os valores de F da Tabela 6 mostraram-se significativos, procedeu-se ao desdobramento dos valores

médios dos rendimentos para uma melhor visualização e discussão dos resultados. Tais desdobramentos são apresentados nas Tabelas de 7 a 9.

As Figuras de 2 a 4 apresentam ilustrações sobre os efeitos dos fatores sobre os rendimentos de produtos.

Com base nos valores de F da análise de variância apresentados na Tabela 6, observa-se um efeito altamente significativo dos fatores temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final no rendimento gravimétrico do carvão de turfa. As interações entre estes fatores também apresentaram significância estatística.

Observa-se a ocorrência de uma perda gradativa de massa de turfa na forma de voláteis em função do aumento da temperatura de degradação. Mencione-se que nesse gradiente ocorreram maiores perdas de massa durante os aquecimentos nas temperaturas mais baixas que nos aquecimentos nas temperaturas mais elevadas. Este comportamento sugere que nas temperaturas mais baixas, destacando a de 450°C , processa-se uma série de reações e transformações químicas mais intensamente em relação aquelas ocorridas nas maiores temperaturas. De fato, de 600 a 900°C continuou havendo quedas gradativas no rendimento gravimétrico de carvão, todavia tendendo para uma estabilização.

TABELA 7. Comparação das médias de rendimento gravimétrico dos produtos da turfa em função da temperatura final e taxa de aquecimento.

Parâmetro	Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/minuto)		
		1	3	5
Rendimento em carvão de turfa (%)	300	88,12 aA*	87,96 aA	84,32 aB
	450	62,91 bA	61,81 bB	61,91 bB
	600	51,02 cB	51,78 cA	52,13 cA
	750	48,62 dA	46,70 dB	47,19 dB
	900	45,17 eA	45,69 eA	45,54 eA
Rendimento em voláteis condensáveis (%)	300	5,91 dB	7,21 dA	7,67 eA
	450	18,22 cB	20,19 cA	20,37 dA
	600	23,81 bA	23,87 bA	23,25 bB
	750	26,78 aA	26,81 aA	25,06 aB
	900	26,85 aA	23,68 bB	21,31 cC
Rendimento em voláteis não condensáveis (%)	300	5,97 eB	4,83 eC	8,01 eA
	450	18,27 dA	18,00 dA	17,71 dA
	600	25,17 cA	24,30 cA	24,62 cA
	750	24,60 bC	24,49 bB	27,22 bA
	900	27,78 aC	30,62 aB	33,15 aA

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

TABELA 8. Comparação de médias de rendimento gravimétrico em carvão e voláteis condensáveis em função da temperatura final e tempo de permanência.

Parâmetro	Temperatura final (°C)	Tempo de permanência (minutos)	
		30	90
Rendimento em carvão de turfa (%)	300	88,72 aA*	84,88 aB
	450	63,78 bA	60,64 bB
	600	51,88 cA	51,40 cA
	750	47,84 dA	47,17 dA
	900	45,45 eA	45,48 eA

Rendimento em voláteis condensáveis (%)	300	5,87 dB	7,99 dA
	450	18,23 cB	21,36 cA
	600	23,42 bA	23,87 bA
	750	26,29 aA	29,14 aA
	900	24,02 bA	23,88 bA

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

TABELA 9. Comparação de médias de rendimento gravimétrico de carvão em função da taxa de aquecimento e tempo de permanência.

Parâmetro	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (minutos)	
		30	90
Rendimento em carvão de turfa (%)	1	60,27 aA*	58,05 aB
	3	59,61 bA	57,97 aB
	5	58,72 cA	57,72 aB

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

O efeito da temperatura final observado no rendimento de carvão de turfa assemelha aos encontrados na literatura, que trata de pirólise de material orgânico. BEL'KEVICH et alii (1971) e FUCHSMAN (1980), trabalhando com pirólise de turfa, observaram que o aumento na temperatura facilita a dissociação de seus componentes com a liberação de voláteis e conseqüentemente acarretando um decréscimo no rendimento em carvão.

O rendimento gravimétrico em carvão de turfa mostrou-se ainda influenciado pela taxa de aquecimento e tem

FIGURA 2. Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico de carvão de turfa.

FIGURA 3. Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis.

FIGURA 4. Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no rendimento gravimétrico de voláteis não condensáveis.

po de permanência na temperatura final conforme pode ser observado na Tabela 7. Verifica-se que o aumento da taxa de aquecimento foi acompanhado de uma diminuição do rendimento de carvão de turfa, particularmente nas menores temperaturas finais. Isto pode ser melhor visualizado na Figura 2. FUCHSMAN (1980) explica que em taxas de aquecimento mais rápidas a turfa tende a expelir voláteis mais abruptamente impedindo uma maior recombinação destes em compostos de alto peso molecular. Havendo formação destes compostos mais estáveis em menor quantidade, há um decréscimo no rendimento em carvão.

O tempo de permanência na temperatura final provocou efeito no rendimento gravimétrico de carvão de maneira mais ou menos semelhante aquele causado pela taxa de aquecimento, o que pode ser melhor visualizado nas Tabelas 8 e 9.

No período de degradação mais curto, 30 minutos, o rendimento em carvão foi maior que aquele conseguido a 90 minutos, particularmente nas menores temperaturas. Portanto, deduz-se que em períodos mais extensos, nas condições de temperaturas mencionadas, há mais oportunidade de eliminação de voláteis na turfa e por conseguinte reduz-se o seu rendimento em carvão.

Denota-se através das Tabelas 7 a 9, que a

temperatura final induz efeito bem mais forte no rendimento em carvão que os demais fatores testados.

Os valores encontrados para rendimento gravimétrico de carvão de turfa, no geral, foram superiores aos normalmente encontrados na literatura. LARBALETIER (s.d.), CHRISTIASSON (1953), TRONT (1958) e FUCHSMAN (1980) encontraram valores em torno de 50% para rendimento gravimétrico de carvão trabalhando com turfa em temperaturas próximas de 500°C. Por sua vez, SILVA & BRITO (1987) obtiveram rendimento em carvão de turfa de 52,1, 62,2 e 62,4%, respectivamente para turfas contendo 3,4, 21,3 e 18,9% de teor de cinzas, quando carbonizadas a 450-500°C e taxa de aquecimento média de aproximadamente 2°C/minuto. Verifica-se pois, que o aparente maior rendimento encontrado se deve ao teor de cinzas relativamente alto na turfa do presente estudo, que atuou como material inerte, uma vez que para efeito de cálculo descontando o seu teor, chega-se a quantidade de carvão de turfa produzida semelhante aquelas da literatura em condições próximas de pirólise.

Com relação ao rendimento em voláteis condensáveis e não condensáveis, considerando os valores de F da análise de variância da Tabela 6, verifica-se que os fatores temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência induziram efeitos estatisticamente significativos.

Os rendimentos em voláteis condensáveis e não condensáveis, também estatisticamente, sofreram efeitos da interação temperatura final e taxa de aquecimento, enquanto que a interação temperatura e tempo de permanência influenciou apenas o rendimento de voláteis condensáveis. Não houve influência da interação taxa de aquecimento e tempo de permanência na produção dos voláteis mencionados.

Como esperava-se, o rendimento gravimétrico em voláteis procedeu-se de maneira inversa ao de carvão de turfa. Foi observado que, como regra geral, quando aumenta-se a temperatura final do processo, resulta-se em um aumento gradativo na perda de voláteis pela turfa, os quais enriquecem as fases líquida e gasosa. O efeito foi mais pronunciado quando o processo ocorreu em temperaturas mais baixas. Este comportamento está de acordo com as observações de SHAPATINA et alii (1960) e CHUKANOV et alii (1962) para os quais, o rendimento em voláteis aumenta gradualmente com a temperatura mas logo após atingir 500-600°C, a quantidade destes produtos formados varia muito pouco. Destarte que nas temperaturas mais altas - 600, a 750 e 900°C, predominou-se maior produção de voláteis não-condensáveis. Esta maior produção destes voláteis, após 600°C, se deve à ocorrência de gaseificação do carvão. Até 500-600°C, desprende-se gases oxigenados e gases hidrogenados, onde sobrepõe-se a produção de hidrocarbonetos. Não sendo interrompido o processo

e a temperatura ultrapassa valores acima desta faixa, como consequência, o gás hidrogênio torna-se predominante. Esta deve ser a razão pela qual se explica, de certa forma, a geração ligeiramente maior de voláteis não-condensáveis a temperaturas mais altas. De maneira semelhante, FUCHSMAN (1980) verificou que a degradação da turfa tende a completar-se em torno de 600-700°C, mas entre as temperaturas de 700 e 900°C ainda pode haver eliminação de produtos voláteis, possivelmente predominando o hidrogênio. Estes produtos devem ser gerados devido a gaseificação do carvão que ocorre nesta faixa de temperatura.

Os resultados obtidos na Tabela 7 mostraram que, com o aumento da taxa de aquecimento, ocorreu uma relativa e ligeira tendência do rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis aumentar nas temperaturas mais baixas e, contrariamente, diminuir nas mais altas. Mas no geral, predominou-se uma queda suave na produção relativa de voláteis condensáveis com o aumento na taxa de aquecimento. Nas mesmas condições, o comportamento de voláteis não condensáveis foi, de maneira geral, aumentar-se com a elevação da taxa de aquecimento, notadamente nas temperaturas de 750 e 900°C.

Pelos resultados obtidos para o carvão de turfa era dese esperar, que o tempo de permanência na temperatura final exercesse influência no rendimento de voláteis. Verifica-se que no período de 90 minutos houve maior produção de voláteis

quando comparado ao de 30 minutos, somente nas temperaturas de 300 e 450°C.

De todo o observado e comentado, depreende-se que a temperatura final induziu efeito mais destacado na pirólise da turfa para produção de carvão de turfa e voláteis que os fatores tempo de permanência e taxa de aquecimento.

Em concordância com o observado, foi verificada uma correlação significativa com coeficiente de correlação de -0,9815 entre rendimento em carvão de turfa e rendimento em voláteis.

4.3. Taxa de redução granulométrica da turfa

A Tabela 10 apresenta os resultados médios para taxa de redução granulométrica da turfa frente a pirólise, enquanto na Tabela 11, tem-se os valores de F da análise de variância.

A Tabela 12 mostra a relação entre temperatura final e taxa de aquecimento na redução granulométrica do carvão.

TABELA 10. Resultados médios da taxa de redução granulométrica da turfa frente a pirólise¹.

Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Taxa de redução granulométrica ¹
300	1	30	0,802
300	1	90	0,882
300	3	30	0,507
300	3	90	0,557
300	5	30	0,460
300	5	90	0,362
450	1	30	0,772
450	1	90	0,894
450	3	30	0,716
450	3	90	0,780
450	5	30	0,748
450	5	90	0,914
600	1	30	0,806
600	1	90	0,793
600	3	30	0,633
600	3	90	0,645
600	5	30	0,650
600	5	90	0,616
750	1	30	0,887
750	1	90	0,873
750	3	30	0,774
750	3	90	0,794
750	5	30	0,589
750	5	90	0,599
900	1	30	0,791
900	1	90	0,903
900	3	30	0,645
900	3	90	0,659
900	5	30	0,569
900	5	90	0,474

¹ Médias de duas repetições, expressa em $\arcsen \sqrt{x/100}$.

TABELA 11. Valores de F para taxa de redução granulométrica da turfa frente a pirólise.

Causa da variação	Valores de F
Temperatura final (A)	6,69**
Taxa de aquecimento (B)	27,17**
Tempo na temperatura final (C)	0,91ns
Interação A x B	2,78*
Interação A x C	0,70ns
Interação B x C	0,51ns
Coeficiente de variação (%)	15,14

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 12. Comparação de médias para taxa de redução granulométrica da turfa frente a interação taxa de aquecimento e temperatura final.

Temperatura final (°C)	Taxa de redução granulométrica ¹		
	1°C/minuto	3°C/minuto	5°C/minuto
300	0,842 aA*	0,532 cB	0,411 cC
450	0,833 aA	0,748 abAB	0,732 aB
600	0,800 aA	0,639 bB	0,633 abB
750	0,880 aA	0,784 aB	0,595 bC
900	0,848 aA	0,652 bB	0,525 bcC

¹ Médias expressa em arc seno $\sqrt{x/100}$.

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

Os resultados individuais de taxa de redução granulométrica de cada tratamento bem como sua análise estatística encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 29 e 30 do Apêndice. Nas Tabelas 28 e 29 do Apêndice também são apresentados os valores individuais da fração de turfa e carvão acima de 10 milímetros usadas nos cálculos da taxa de redução granulométrica.

As ilustrações dos resultados médios considerando a temperatura final e taxa de aquecimento estão na Figura 5.

FIGURA 5. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na taxa de redução granulométrica da turfa.

Com base nos valores de F, verifica-se que houve efeito significativo somente dos fatores temperatura final e taxa de aquecimento e da interação ocorrida entre estes na taxa de redução granulométrica.

Na média, independente dos efeitos específicos de cada fator, ocorreu uma redução granulométrica em torno de 40 a 45%. De certa forma, este comportamento esta de acordo com observações feitas por FUCHSMAN (1980). Tal autor menciona que a redução no tamanho da turfa inicia-se a 250°C e atinge o gradiente máximo em torno de 450 e após 500°C ocorre pouca redução.

O fator que mais contribuiu para a diminuição na granulométrica da turfa frente a termodegradação, como pode ser verificado na Tabela 12, foi a taxa de aquecimento.

Esta sensível redução na granulometria em função da pirólise deve estar relacionada, muito provavelmente, com a taxa e a quantidade de voláteis eliminados durante o processo, bem como fenômenos ligados à ruptura e fragmentação da turfa.

4.4. Características do carvão de turfa

O carvão de turfa foi caracterizado através das determinações da densidade verdadeira, densidade aparente, porosidade, poder calorífico superior e análise imediata. Logo a seguir, são apresentados e discutidos os resultados individualmente para cada parâmetro analisado. Enfatiza-se os efeitos que os fatores temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final, empregados na pirólise da turfa, induziram nas características do seu carvão.

4.4.1. Densidade e porosidade do carvão de turfa

As condições de pirólise empregadas no presente estudo influenciaram o comportamento da densidade verdadeira e da densidade aparente do carvão de turfa, notadamente a temperatura final.

A Tabela 13 apresenta os resultados médios globais enquanto na Tabela 14 é mostrado os valores de F obtidos nas análises de variância.

No Apêndice, a Tabela 31 lista os dados individuais dos tratamentos para densidade verdadeira, densidade

TABELA 13. Resultados médios de densidade e porosidade do carvão de turfa.

Tempe- ratura final (°C)	Taxa de aqueci- mento (°C/min)	Tempo de permanên- cia (min)	Densidade verdadeira (g/cm ³)	Densidade aparente (kg/m ³)	Porosidade (%)
300	1	30	1,49	491	67,16
300	1	90	1,53	469	69,45
300	3	30	1,46	496	66,13
300	3	90	1,49	531	64,33
300	5	30	1,43	499	65,21
300	5	90	1,46	497	66,07
450	1	30	1,49	501	66,44
450	1	90	1,55	553	64,22
450	3	30	1,54	535	65,24
450	3	90	1,55	566	63,48
450	5	30	1,57	557	64,63
450	5	90	1,59	513	67,71
600	1	30	1,81	622	65,71
600	1	90	1,75	622	64,43
600	3	30	1,73	571	67,08
600	3	90	1,72	606	64,88
600	5	30	1,79	631	64,79
600	5	90	1,77	546	69,13
750	1	30	1,76	629	64,35
750	1	90	1,80	627	65,27
750	3	30	1,73	605	65,10
750	3	90	1,74	627	64,08
750	5	30	1,75	621	64,61
750	5	90	1,79	616	65,65
900	1	30	1,78	787	55,70
900	1	90	1,88	816	56,57
900	3	30	2,08	772	62,88
900	3	90	2,11	746	64,76
900	5	30	1,99	657	67,04
900	5	90	2,02	674	66,73

¹ Médias de duas repetições.

aparente e porosidade enquanto nas Tabelas 32 a 34, respectivamente, são apresentadas as análises de variância.

TABELA 14. Valores de F para densidade e porosidade do carvão de turfa.

Causa da variação	Densidade verdadeira	Densidade aparente	Porosidade
Temperatura final (A)	253,14**	65,95**	5,59**
Taxa de aquecimento (B)	3,74*	3,28ns	4,49*
Tempo de permanência (C)	3,80ns	0,05ns	0,26ns
Interação A x B	10,95**	2,75*	5,16**
Interação A x C	1,75ns	0,24ns	0,09ns
Interação B x C	0,32ns	1,64ns	1,75ns
Coeficiente de variação (%)	2,52	6,66	3,64

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Quando os valores de F apresentaram-se significativos, procedeu-se o desdobramento dos valores médios para melhor visualização e discussão dos resultados. Tal desdobramento é apresentado na Tabela 15.

TABELA 15. Comparação de médias de densidade verdadeira, densidade aparente e porosidade do carvão de turfa em função da temperatura final e taxa de aquecimento.

Parâmetro	Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/minuto)		
		1	3	5
Densidade verdadeira (g/cm ³)	300	1,51 cA*	1,48 cA	1,46 dA
	450	1,52 cA	1,54 cA	1,58 cA
	600	1,78 bA	1,73 bA	1,78 bA
	750	1,78 bA	1,74 bA	1,77 bA
	900	1,88 aB	2,05 aA	2,01 aA
Densidade aparente (kg/m ³)	300	480 cA	513 cA	498 dA
	450	527 cA	550 bcA	535 cdA
	600	622 bA	588 bA	589 bcA
	750	628 bA	616 bA	619 abA
	900	774 aA	757 aA	665 aB
Porosidade (%)	300	68,31 aA	65,23 aA	65,64 aA
	450	65,33 aA	64,36 aA	66,17 aA
	600	65,08 aA	65,98 aA	66,96 aA
	750	66,81 aA	64,59 aA	65,13 aA
	900	58,83 bC	63,83 aB	66,88 aA

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

As Figuras de 6 a 8 mostram ilustrações dos efeitos dos fatores sobre os parâmetros de densidade e porosidade.

FIGURA 6. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na densidade verdadeira do carvão de turfa.

FIGURA 7. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na densidade aparente do carvão de turfa.

FIGURA 8. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final na porosidade do carvão de turfa.

Conforme se pode notar pela Tabela 14, a densidade verdadeira foi influenciada, estatisticamente, apenas pela temperatura final e taxa de aquecimento e pela interação ocorrida entre estes fatores.

Nas temperaturas de 300 e 450°C houve uma relativa redução da densidade verdadeira, considerando-se o valor de 1,61 g/cm³ originalmente existente na turfa.

Isto pode ser explicado pelo grande efeito de perda de massa ocorridos em temperaturas mais baixas. Todavia, com a elevação da temperatura considerando toda a faixa de 300 à 900°C, observou-se na média a tendência de acréscimos sistemáticos na densidade verdadeira do carvão de turfa. Isto pode ser observado na Tabela 15. Este aumento foi mais acentuado na faixa de 300 à 600°C, foi pequeno daí até 750°C. Entretanto, de 750 a 900°C novamente houve um acréscimo bastante acentuado na densidade verdadeira do carvão. Este comportamento também tem sido observado para madeira. No caso, MENDES et alii (1982) relata que isso ocorre em função 'de um possível rearranjo dos átomos de carbono resultando em uma estrutura mais ordenada. Outros autores que relatam a existência de um aumento nos valores da densidade verdadeira com a elevação da temperatura da pirólise da madeira são WENZL (1970), MENDES et alii (1982) e OLIVEIRA et alii

(1982d). Da mesma forma SILVA (1986) com frutos de palmáceas e Grumpelt¹ e Relander et alii² citados por FUCHSMAN (1980) estudando a degradação térmica da turfa.

Com relação a taxa de aquecimento, observa-se, em termos médios, que sua contribuição na variação da densidade verdadeira foi relativamente pequena.

Quanto a densidade aparente do carvão de turfa, com base nos valores de F obtidos na análise de variância, listados na Tabela 14, verifica-se que somente a temperatura final e sua interação com a taxa de aquecimento produziram efeito com significância estatística.

Os valores médios da densidade aparente do carvão, foram maiores do que aquele encontrado originalmente na turfa. Isto pode ser explicado pela densidade verdadeira do carvão que é maior e inclusive pela ocorrência de um teor mais elevado de cinzas do carvão, por ser este material relativamente inerte no processo de pirólise. Convém mencionar que a densidade das cinzas de turfa é bastante elevada. Determinação realizada à parte indicou um valor médio de 2.41 g/cm³.

Quanto maiores foram as temperaturas finais

¹ GRUMPELT, H. Glueckauf, 112, 599-607, 1976.

² RELANDER, J.; HANNI, J. & TUOMIKOSKI, E. **Manufacture of metallurgical coke from peat.** Outokumpu Oi, Espoo, Finland, 1975.

de pirólise, maiores foram os valores de densidade aparente do carvão. Este aumento foi diretamente proporcional ao teor de cinzas do carvão que também foi aumentando conforme maiores foram estas temperaturas finais. Em parte, esta é a razão para explicar o comportamento verificado para a densidade aparente.

Por outro lado, verifica-se que o carvão sofreu sensível redução em sua granulometria conforme já destacado anteriormente quando comparado com a turfa original. Essa redução granulométrica conforme também já discutido pode ter surgido em função de uma redução de volume. Dai deduzir-se essa redução de volume proporcionando aumento da densidade aparente do carvão.

No geral, o aumento verificado na densidade aparente do carvão assemelha-se ao comportamento observado por Grumpelt¹ e Relander et alii², citados por FUCHSMAN (1980). Tais autores, por sinal, relatam que a densidade do produto sólido obtido da degradação térmica da turfa reflete o seu teor de cinzas e sua porosidade.

Na porosidade, os valores obtidos para F na análise de variância indicam que a temperatura final e taxa

¹ GRUMPELT, H. Glueckauf 112, 599-607, 1976.

² RELANDER, H.; HANNI, J. & TUOMIKOSKI, E. Manufacture of metallurgical coke from peat. Outokumpu Oi, Espoo, Finland, 1975.

de aquecimento bem como a interação ocorrida entre os mesmos apresentaram significância estatística.

Observa-se que a variação da porosidade do carvão de turfa em função das condições de termodegradação foi relativamente pequena. Isto é compreensível, uma vez que a porosidade reflete a relação entre a densidade aparente e a densidade verdadeira. Conforme foi notado anteriormente, aquelas densidades aumentaram de maneira semelhante e proporcionalmente com a elevação da temperatura final. Como tal, a razão entre as duas modalidades de densidade foram mantidas mais ou menos constante. Por conseguinte, a porosidade tornou-se praticamente constante diante dos tratamentos empregados.

Em relação a matéria prima original, a porosidade do carvão foi inferior.

Para densidade e porosidade, o efeito da taxa de aquecimento foi verificado somente a 900°C, o que pode ser uma indicação de condição de temperatura ocorrendo um maior rearranjo estrutural e possivelmente também um maior gradiente de contração nas dimensões do carvão.

No geral, o efeito da interação verificada entre taxa de aquecimento e temperatura final foi pouco relevante para densidade e porosidade do carvão de turfa.

4.4.2. Poder calorífico superior do carvão de turfa

Na Tabela 16 encontram-se os resultados médios para poder calorífico superior no carvão de turfa.

Os valores de F obtidos na análise de variância são apresentados na Tabela 17, enquanto na Tabela 18 têm-se as médias de poder calorífico superior considerando isoladamente os fatores que compõem os tratamentos.

Nas Figuras 9 e 10 são ilustrados os resultados médios de poder calorífico superior do carvão de turfa, respectivamente, para as interações ocorridas entre temperatura final e taxa de aquecimento e entre temperatura final e tempo de permanência.

Os resultados individuais de cada tratamento e análise de variância do poder calorífico superior do carvão de turfa estão, respectivamente, nas Tabelas 35 e 36 do Apêndice.

Com base nos valores de F apresentados na análise de variância, observa-se que a temperatura final e tempo de permanência induziram efeito estatisticamente significativo para poder calorífico superior. Ao contrário, as interações entre fatores bem como a taxa de aquecimento não influenciaram estatisticamente aquele parâmetro.

TABELA 16. Resultados médios de poder calorífico superior para carvão de turfa.

Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Poder calorífico superior (kcal/kg)
300	1	30	5044
300	1	90	5108
300	3	30	5184
300	3	90	5260
300	5	30	5138
300	5	90	5149
450	1	30	5501
450	1	90	5912
450	3	30	5637
450	3	90	5656
450	5	30	5815
450	5	90	5766
600	1	30	6385
600	1	90	6784
600	3	30	6499
600	3	90	6732
600	5	30	6136
600	5	90	6682
750	1	30	6454
750	1	90	6581
750	3	30	6719
750	3	90	6738
750	5	30	6974
750	5	90	6772
900	1	30	6707
900	1	90	6860
900	3	30	6438
900	3	90	6715
900	5	30	6637
900	5	90	6813

¹ Médias de suas repetições

TABELA 17. Valores de F para poder calorífico superior do carvão de turfa.

Causa da variação	F
Temperatura final (A)	119,94**
Taxa de aquecimento (B)	0,30ns
Tempo de permanência (C)	6,97*
Interação A x B	1,28ns
Interação A x C	1,54ns
Interação B x C	0,51ns
Coefficiente de variação (%)	3,59

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 18. Comparação de médias de poder calorífico superior do carvão de turfa em função de cada fator testado na pirólise.

Fatores	Temperatura final (°C)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	
Temperatura final (°C)	300	5147	d
	450	5714	c
	600	6536	b
	750	6707	a
	900	6695	ab

Taxa de aquecimento (°C/min)	1	6134	a
	3	6158	a
	5	6188	a

Tempo de permanência (min)	30	6085	b
	90	6235	a
Média geral do experimento		6160	

As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan

FIGURA 9. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final no poder calorífico superior do carvão de turfa.

FIGURA 10. Efeito do tempo de permanência e temperatura final no poder calorífico superior do carvão de turfa.

A medida que elevou-se a temperatura, observa-se acréscimos nos valores do poder calorífico superior, sendo que nas temperaturas mais altas houve uma tendência de estabilização.

Isto é compreensível tendo em vista que o aumento na temperatura provoca maior concentração de carbono fixo e menor concentração no teor de matérias voláteis. Confirmando este comportamento foi observado que o poder calorífico superior do carvão tem uma forte correlação positiva ($r = 0,9012$) com o teor de carbono fixo e uma negativa ($r = -0,9371$) com o teor de matérias voláteis.

O comportamento verificado no poder calorífico superior do carvão de turfa está de acordo com averiguações realizadas por FUCHSMAN (1980) para turfa e de COUTINHO (1984) e FARIA (1984) para madeira.

Por sua vez, o tempo de permanência na temperatura final influencia, positivamente, o poder calorífico superior do carvão.

Como era esperado e considerando os resultados médios do poder calorífico superior, observa-se que este é bem mais influenciado pela temperatura final do que pelos fatores taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final.

No geral, o comportamento do poder calorífico superior do carvão de turfa assemelha-se ao verificado na literatura tanto para turfa (FUCHSMAN, 1980), como para madeiras (EARL, 1975; TROSSERO, 1981; COUTINHO, 1984 e FARIA, 1984).

Comparativamente aos dados de Keppeler e Holfamann¹ citados por FUCHSMAN (1980) os resultados de poder calorífico superior foram ligeiramente inferiores. Isto pode ser explicado pelo alto teor de cinzas contido na turfa originalmente, que por conseguinte gerou um carvão com também alto teor de cinzas, que atua como material inerte. Tanto é verdade, que o crescente aumento verificado no teor de cinzas, em função da elevação da temperatura, imprimiu um menor gradiente de elevação no poder calorífico superior, em função de aumento naquele fator. Por outro lado, os valores médios do poder calorífico obtidos nos tratamentos com temperatura de 450°C, estão de acordo com aqueles mencionados por SILVA & BRITO (1987) para carvão de turfa com alto teor de cinzas e obtido em condições de pirólise próximas ao do presente estudo.

¹ KEPPELER, G. & HOLFFMANN, H. *Brennstoff Chemie*, 13:401-6, 1932.

4.4.3. Análise imediata do carvão de turfa

Os fatores temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final provocaram mudanças substanciais nos resultados da análise imediata do carvão de turfa, ou seja nos teores de materias voláteis, cinzas e carbono fixo.

Seus efeitos podem ser observados pelos resultados médios da análise imediata apresentados na Tabela 19 e pelos valores de F obtidos nas análises de variância apresentados na Tabela 20.

Os resultados individuais globais, bem como as análises de variância são apresentados nas Tabelas 35 e de 37 a 39 do Apêndice.

As Figuras de 11 a 13 apresentam ilustrações sobre os efeitos dos fatores testados sobre a composição imediata do carvão de turfa.

Quando os valores de F da Tabela 20 apresentaram-se significativos para interação entre fatores, procedeu-se ao desdobramento dos valores médios dos parâmetros da composição imediata para melhor visualização e discussão dos resultados. Tais desdobramentos são mostrados nas Tabelas de 21 a 23.

TABELA 19. Resultados médios da análise imediata do carvão de turfa¹.

Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Teor de matérias voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de carbono (%)
300	1	30	49,50	20,41	30,08
300	1	90	45,29	23,96	30,75
300	3	30	46,59	23,35	30,05
300	3	90	46,67	20,72	32,35
300	5	30	45,27	22,22	32,50
300	5	90	45,00	20,86	34,13
450	1	30	32,50	23,09	44,41
450	1	90	25,26	31,34	43,49
450	3	30	27,31	30,13	42,53
450	3	90	26,61	16,19	47,19
450	5	30	27,80	24,13	48,06
450	5	90	23,53	31,82	44,60
600	1	30	13,27	37,05	49,67
600	1	90	12,04	32,79	55,19
600	3	30	14,85	26,92	58,23
600	3	90	13,99	31,32	54,68
600	5	30	15,40	30,94	53,65
600	5	90	14,21	30,15	55,64
750	1	30	7,61	39,65	52,74
750	1	90	7,74	38,34	53,91
750	3	30	8,48	39,04	52,47
750	3	90	7,11	38,18	54,70
750	5	30	7,03	35,51	59,45
750	5	90	6,82	36,69	56,48
900	1	30	5,04	39,59	55,57
900	1	90	3,74	37,20	59,06
900	3	30	4,13	40,28	55,58
900	3	90	3,60	32,63	63,76
900	5	30	3,72	34,67	61,60
900	5	90	3,30	36,65	61,04

¹ Médias de duas repetições

TABELA 20. Valores de F para análise imediata do carvão de turfa.

Causa de variação	Teor de matérias voláteis	Teor de cinzas	Teor de carbono fixo
Temperatura final (A)	2441,86**	94,57**	341,27**
Taxa de aquecimento (B)	3,56*	4,15*	12,07**
Tempo de permanência (C)	25,22**	0,01ns	6,41*
Interação A x B	2,95*	1,63ns	1,29ns
Interação A x C	4,24*	3,46*	1,49ns
Interação B x C	3,95*	3,42*	3,76*
Coefficiente de variação (%)	6,13	7,51	4,23.

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

FIGURA 11. Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no teor de matérias voláteis do carvão de turfa.

FIGURA 12. Efeito da taxa de aquecimento e temperatura final no teor de cinzas do carvão de turfa.

FIGURA 13. Efeito da taxa de aquecimento, temperatura final e tempo de permanência no teor de carbono fixo do carvão de turfa.

TABELA 21. Comparação de médias do teor de matérias voláteis do carvão de turfa em função da temperatura final e da taxa de aquecimento.

Parâmetro	Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)		
		1	2	3
Teor de matérias voláteis (%)	300	47,40 aA*	46,63 aA	45,14 aB
	450	28,88 bA	26,97 bA	25,66 bB
	600	12,66 cB	14,42 cAB	14,81 cA
	750	7,68 dA	7,80 dA	6,93 dA
	900	4,39 eA	3,87 eA	3,51 eA

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

TABELA 22. Comparação de médias do teor de matérias voláteis e de cinzas do carvão de turfa em função da temperatura final e tempo de permanência.

Parâmetro	Temperatura final (°C)	Tempo de permanência (minutos)	
		30	90
Teor de matérias voláteis (%)	300	47,12 aA*	45,66 aA
	450	29,20 bA	25,13 bB
	600	14,51 cA	13,41 cA
	750	7,71 dA	7,22 dA
	900	4,30 eA	3,55 eA

Teor de cinzas (%)	300	21,99 dA	21,85 cA
	450	25,78 cB	29,78 bA
	600	31,64 bA	31,42 bA
	750	38,07 aA	37,74 aA
	900	38,18 aA	35,16 aB

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

TABELA 23. Comparação de médias de análise imediata do carvão de turfa em função da taxa de aquecimento e tempo de permanência.

Parâmetro	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	
		30	90
Teor de matérias voláteis (%)	1	21,58 aA*	18,81 aB
	3	20,28 bA	19,60 aA
	5	19,85 cA	18,57 aA
Teor de cinzas (%)	1	31,96 aA	32,73 aA
	3	31,95 aA	29,81 bA
	5	29,50 bA	31,04 abA
Teor de carbono fixo (%)	1	46,50 bB	48,48 bA
	3	47,77 bB	50,54 aA
	5	51,05 aA	50,38 aA

* As médias na coluna com mesma letra minúscula ou na linha com mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Waller-Duncan.

Verifica-se que o teor de matérias voláteis do carvão foi influenciado estatisticamente pela temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência, bem como pelas interações ocorridas entre estes fatores.

O decréscimo encontrado no teor de voláteis no carvão de turfa com a elevação da temperatura final está de acordo com observações feitas por CHUKANOV et alii (1962) para turfa e os resultados conseguidos por WENZL (1970), EARL (1975), MENDES et alii (1982), OLIVEIRA et alii (1982d) e ALMEIDA (1983) em carbonização de madeiras.

Isto é compreensível tendo em vista que, o aumento de temperatura provoca a expansão dos gases e sua expulsão do interior da turfa durante sua pirólise.

Foi observada uma forte correlação positiva ($r = 0,9812$) entre o teor de matérias voláteis do carvão de turfa e o seu rendimento gravimétrico em carvão. Este rendimento em carvão foi afetado de maneira inversa a variação na taxa de aquecimento. Por esta razão, observa-se, também, um decréscimo no teor de matérias voláteis com o aumento da taxa de aquecimento (Figura 11 e Tabela 21).

Foi verificada uma correlação significativa e negativa entre o teor de matérias voláteis e o rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis e não condensáveis. No

item 4.2., através das Tabelas 5 e 8, foi observado que o maior tempo de permanência, para uma determinada temperatura final, provoca uma maior eliminação de voláteis. Portanto, era esperado que o tempo de permanência exercesse influência de maneira inversa, como de fato verifica-se, sobre o teor de matérias voláteis no carvão de turfa.

Verifica-se também, que para os materiais voláteis a temperatura final proporcionou efeito preponderante em relação aos outros fatores testados na pirólise da turfa.

Os resultados médios do teor de matérias voláteis do carvão, de certa forma, estão de acordo com aqueles encontrados por FUCHSMAN (1980) que foram 28,15 e 17,50%, respectivamente, nas temperaturas de 450 e 550°C com turfa contendo 7,60% de umidade.

Quanto a cinza verifica-se que o seu teor foi estatisticamente, influenciado pela temperatura final e taxa de aquecimento e pelas interações ocorridas entre temperatura final e tempo de permanência e entre este com a taxa de aquecimento.

Presume-se que a quantidade real de cinzas contida originalmente na matéria prima vai permanecer a mesma encontrada no produto sólido da pirólise. Portanto, a cinza torna-se uma matéria inerte na composição da tur

fa.

Por outro lado, o tratamento térmico provoca a eliminação de voláteis com a consequente perda de massa por parte da turfa, aumentando-se a quantidade relativa de cinzas no carvão obtido. Este aumento relativo de cinzas na composição do carvão é diretamente proporcional ao teor contido originalmente na matéria prima (Tabela 4) e o rendimento gravimétrico em voláteis.

O maior conteúdo relativo de cinzas no carvão foi encontrado nas temperaturas finais de 750 e 900°C, que por sua vez proporcionaram rendimento gravimétrico mais elevado em voláteis condensáveis e não condensáveis.

Verifica-se que é nitidamente destacado o efeito de temperatura final sob os demais fatores testados na termodegradação de turfa quanto ao teor de cinzas no carvão.

Em relação ao teor de carbono fixo, estatisticamente, ele foi influenciado pelos fatores testados na pirólise, bem como pela interação ocorrida entre a taxa de aquecimento e o tempo de permanência na temperatura final.

O aumento do teor de carbono fixo do carvão provocado pelo aumento da temperatura final até próximo de 700°C já é bastante conhecido, mormente para carbonização de madeira, e tem sido mencionado por vários autores como WENZL

(1970), PETROFF & DOAT (1978) e FARIA (1984), trabalhando com várias espécies florestais e por JUVILLAR (1980), MENDES et alii (1982), OLIVEIRA et alii (1982b) e OLIVEIRA et alii (1982d), trabalhando com espécies de *Eucalyptus*. Para a degradação térmica da turfa este comportamento foi observado por CHUKANOV et alii (1982) e FUCHSMAN (1980).

Na faixa de temperatura entre 300 e 600°C, o ganho conseguido com o aumento no teor de carbono fixo no carvão de turfa foi bem destacado; entretanto, o ganho observado nas temperaturas acima de 600°C foi relativamente pequeno.

A Tabela 23 mostra que houve um ligeiro ganho no teor de carbono fixo do carvão com a elevação da taxa de aquecimento e também com o aumento do tempo de permanência final.

Isto é compreensível, pois, a medida que proporcionou-se uma pirólise mais rápida, com maior taxa de aquecimento, houve uma tendência de liberar e expulsar os produtos voláteis da turfa mais abruptamente. Como consequência, tornou-se o produto sólido mais concentrado em carbono fixo. Por sua vez, é evidente que quanto maior for o tempo de permanência numa determinada temperatura final, maior vai ser a oportunidade para liberar mais voláteis, redundando num maior teor de carbono fixo no produto sólido fi

nal. Tal fato é ainda evidenciado pelo coeficiente de correlação igual a 0,9387 verificado entre o teor de carbono fixo do carvão e o rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis e não condensáveis. Este fato é ainda realçado pela forte correlação negativa ocorrida entre o teor de carbono fixo e o teor de matérias voláteis do carvão de turfa.

Com base nos valores de F da análise de variância e pelas médias do teor de carbono fixo do carvão encontradas nas Tabelas 21 e 22, depreende-se que este parâmetro foi influenciado com maior evidência pela temperatura final do que pelos demais fatores usados na pirólise da turfa.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e considerando o material e as condições empregadas neste estudo, pode concluir-se que:

- a. a turfa utilizada é do tipo energética;
- b. os rendimentos dos produtos da pirólise de turfa e as características de seu carvão são influenciados pelos fatores de tratamento empregados;
- c. a temperatura final foi o fator que exerceu maior efeito no rendimento gravimétrico dos produtos da pirólise de turfa, bem como nas características do seu carvão;
- d. o rendimento gravimétrico de carvão sofreu reduções enquanto os voláteis condensáveis e não-condensáveis sofre-

ram acréscimos quanto maior foi a temperatura final da pi
rólise de turfa;

- e. nas temperaturas mais baixas de pirólise, observou-se que o rendimento gravimétrico de carvão de turfa diminuiu e de voláteis aumentou com a elevação da taxa de aquecimento e do tempo de permanência na temperatura final;
- f. a turfa, originalmente classificada acima de 10 mm, sofreu redução na granulometria a níveis de 40 a 45% após sua pirólise, sendo que o fator que mais contribuiu para este comportamento foi a taxa de aquecimento;
- g. as densidades verdadeira e aparente do carvão aumentaram quanto maior foi a temperatura final da pirólise de turfa;
- h. dentre os parâmetros analisados, a porosidade foi a que apresentou-se menos influenciada pelos fatores testados;
- i. quanto maior foi a temperatura final da pirólise maior foi o valor do poder calorífico superior do carvão de turfa até a temperatura de 750°C , acima desta houve tendência de estabilização;
- j. quanto maior foi a temperatura final e o tempo de permanência da pirólise reduziu-se o teor de matérias voláteis e aumentou-se os teores de cinza e de carbono fixo do carvão de turfa;

- k. o poder calorífico superior do carvão de turfa foi correlacionado, positivamente com a produção de voláteis durante a pirólise e com o teor de carbono fixo e, negativamente com o rendimento gravimétrico em carvão de turfa e o seu teor de matérias voláteis; e,
- l. é possível obter-se carvão de turfa com diferentes características e, portanto, com possibilidades de múltiplas aplicações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.M. Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedade dos produtos de carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Viçosa; 1983. 40 p. (Tese - Mestrado - UFV).

ANSON, D.; HAZARD, H.R.; MURIN, J.M. & HONEA, F.I. The potential for use of peat blends with coal for electric power generation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME/IEEF. **Power Generation Conference.** 4-8 october, 1981. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Normas técnicas, NBR - Nº 8112 de 1983.** Brasília, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Normas técnicas NBR - Nº 8633 de 1985. Brasília, 1985.

BEL'KEVICH, P.I. et alii. Thermal decomposition of individual components of seed peat. Ser. Khimya Navuk (5): 53-6, 1971. Apud Chemical Abstract, 76(8): 114, 1972.

BERTHELOT, C. & KLING, M.A. La tourbe: exploitation et conditionnement, Ed. Dunop. Paris, 1943. 219 p.

BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - Balanço energético nacional. Brasília, 1986. 148 p.

BRITO, J.O. Uso energético da madeira. Piracicaba. ESALQ/USP, 1978. 40p. (datilografado).

BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E.G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS. Anais, São Paulo, 1982. p.101-36.

BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E.G. Comportamentos isolados de lignina e da celulose da madeira frente à carbonização. Circular Técnica. IPEF, Piracicaba, (28):1-4, 1977.

CENCIG, M.O.; CENCIG, E.G.S.; SCHUCHARDT, U.; LUENGO, C.A.

Insumos químicos a partir de hidrólise do carvão. **Energia Fontes Alternativas**, 5(24): 24-42, 1983.

CHRISTIANSSON, B. Low temperature carbonization of peat and constituents. **Acta Polytech. Chemi. Ser.** 3(6): 7-128, 1953. **Apud Chemical Abstract**, 48(11): 5080 d, 1954.

CHUKANOV, Z.I.; KASHURICHEV, A.P. & STOMANS, Ya.A. Effect of composition and of increase in yield of volatile products in fuel pyrolysis at high heating rates. **Doch. Akad. Nauk.** 555R. 143: 162-5, 1962. **Apud Chemical Abstracts**, 57(1): 1200 h, 1962.

COHEN, A.D. Obtaining more precise description of peats by use of oriented microtome sections. **In**: JARRET, P.M. **Testing of Peats and Organic Soils, ASTM 820.** New York, American Society for Testing and Materials, 1983. p. 37-51.

CONCEIÇÃO, P.C. Tecnologia Outokumpu de processamento e utilização de turfas. **Energia Fontes Alternativas** 4(20):72-81, 1982.

- COUTINHO, A.R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada as características da madeira de E. saligna e temperatura de carbonização.** Piracicaba, 1984. 76 p. (Tese - Mestrado, ESALQ/USP).
- EARL, D.E. **Forest energy and economic development**, Oxford, Claredon Press. 1975. 128 p.
- FARIA, W.L.F. **A jurema-preta (Mimosa hostilis Benth.) como fonte energética do semi-árido do Nordeste - Carvão.** Curitiba, 1984. 113 p. (Tese - Mestrado - UFPr).
- FARNHAM, R.S. **Potential of peat for fuel.** University of Minnesota, 1974. 29 p.
- FUCHSMAN, C. **Peat Industrial, Chemistry and Technology.** New York, Academic Press, 1980. 278 p.
- GOMES, P.A. & OLIVEIRA, J.B. **Teoria da carbonização da madeira.** In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS . **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980. p. 27-42.
- GOODWIN, E. **A turfa no Brasil. Energia Fontes Alternativas.** 5(25/26): 7-8, 1983.
- HARRIS, A.C. **Charcoal production.** In: WORLD FORESTRY CONGRESS, 8, Jakarta, 1978. 15 p. (mimeografado)

HINRICKSEN, D. Peat power: black to the bogs. *Ambio*, 10(5), 1981.

JAAKKO POYRY ENGENHARIA. Turfa uma alternativa energética, econômica e regional. *Energia Fontes Alternativas*, 5 (25/26): 9-14, 1983.

JUVILLAR, J.B. Carvão-vegetal, matéria prima energética. *In* *Indústria e Produtividade*, Rio de Janeiro (137) 23-6, jan/fev, 1980.

KEYS, D. Effect of peat type and decomposition on the calorific value of some New Brunswick peats. *In*: JARRETT, P.M. *Testing and Organic Soils*, ASTM STP 820. New York, American Society for Testing and Materials, 1983. p. 111-21.

KIEHL, E.J. *Fertilizantes orgânicos*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KUMOTO, E.T.; CONSTANZO Jr., J. & MONTICELI, J.J. Carvão, turfa e rochas oleígenas. *In*: *Companhia Energética de São Paulo*, CESP, 1985. 58 p. (Série Pesquisa e Desenvolvimento, 14).

LARBALÉTRIER, A. *La tourbe et les tourbères*. Paris, Masson et Cie. s.d. 189 p.

LEMASTER, G.S.; BARTELLI, L.J. & SMITH, M.R.

Characterization of Organic Soils as energy sources. In:
JARRETT, P.M. **Testing of Peats and Organic Soils, ASTM**
STP 820. New York, American Society for Testing and
Materials, 1983. p. 122-37.

LEPPA, K. Availability and utilization of peat and lignite
as boiler fuel. TAPPI Anual Meeting, 1981. **Proceedings,**
Atlanta, 1981. p. 339-41.

MARTINO, E.S. & KURTH, G.M. Turfa - um combustível a espera
de utilização. **Energia Fontes Alternativas 4.** (20): 64-
-71, 1982.

MATTAR, H. & DELAZARO, W. Peat as an energy alternative in
the State of São Paulo, Brasil. In: **Symposium Papers of**
as an Energy Alternative, 1980, Institute of Gas Techno-
logy, Arlington, 1980.

MENDES, M.G.; GOMES, P.A. & OLIVEIRA, J.B. Propriedades e
controle de qualidade do carvão vegetal. In: **FUNDAÇÃO**
CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Produção e utiliza-
ção do carvão vegetal. Belo Horizonte, 1982. p. 75-90.

OKAGAWA, H. Lavra experimental de turfa no rio Mogi-Guaçu.
In: **SEMINÁRIO SOBRE TURFA: PROSPECÇÃO, PRODUÇÃO E USOS.**
São Paulo, 1985. **Anais.** São Paulo, Companhia Energética
de São Paulo, 1985. p. 49-57.

OLIVEIRA, L.T. & ALMEIDA, M.R. Avaliação de carvão vegetal.

In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980. p. 45-53.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal.** Belo Horizonte, 1982a. p. 63-102.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão Vegetal.** Belo Horizonte, 1982b. p. 7-38.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R. Propriedades do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão Vegetal.** Belo Horizonte, 1982c. p. 39-62.

OLIVEIRA, J.B.; VIVACQUA Filho, A.; MENDES, M.G. & GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal.** Belo Horizonte, 1982d. p. 59-74.

PETROFF, G. & DOAT, J. Pirolise des bois tropicaux: influencia de la composition chimique des bois sur les produits de destillation. **Bois et Forets de Tropiques**, Nogent-sur Marne, (117): 51-64, jan/fev. 1978.

PUNWANI, D.V. Peat as an energy alternative: An overview. In: **PEAT as an Energy Alternative**. Arlington, Institute of Gas Technology, 1980a, 35 p.

PUNWANI, D.V. Synthetic fuels from peats. In: **INTERNATIONAL PEAT CONGRESS**, Duluth, August 17-23, 1980b. p. 49-81.

PUNWANI, D.V. & RADER, A.M. Gas from peat: a good source of heat. **Hydrocarbon Processing**, :107-113, 1978.

RAMALHO, A.M. Carvões vegetais para gasogênios. Lisboa, Ministério da Economia. 1943. 110 p.

RODRIGUES, E.C. **Solução energética**. 2 ed. São Paulo, Editora Unidas, 1983. 361 p.

SHAFIZADEH, F.; SARKANEN, K.V. & TILLMAN, D.A. **Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins**. New York, Academic Press, 1976. 320 p.

- SHAPATINA, E.A.; KASHURICHEV, A.P. & KOUVAZINA, L.A. Thermal decomposition of peat and shale by heating with a solid heat carrier. *Energotekhnika. Ispol'zovanie Topliva, Akad. Nauk. S.S.S.R., Energ. Inst. in G.M. Krshizhanovskogo*, 1: 171-201, 1960. *Apud. Chemical Abstract*, 55(7): 6823b, 1961.
- SILVA, D.A. & BRITO, J.O. Estudo comparativo da carbonização de três origens de turfas em relação a madeira de *Eucalyptus grandis*. *IPEF, Piracicaba* (36) ago. 1987. (no prelo).
- SILVA, J.C. Endocarpos de babaçu (*Orbignya* spp. Mart.) e de macaúba (*Acrocomia sclerocarpa* Mat.) comparados à madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex. Maiden para a produção de carvão vegetal. Piracicaba, 1986. 112 p. (Tese - Mestrado - ESALQ/USP).
- SILVA, O. A turfa agrícola no Brasil - Aproveitamento, produção e mercado real e potencial. *In: SEMINÁRIO SOBRE TURFA: Prospecção, Produção e Usos. São Paulo, 1985. Anais, São Paulo, Companhia Energética de São Paulo, 1985. p. 95-110.*

SUSCZYNSKI, E.F. Turfa, o novo combustível nacional. *Energia Fontes Alternativas* 4(2): 6-61, 1981.

TRONT, G. Pilot - plant peat carbonization design of industrial furnaces. *Torfa* 3 (2): 23-31, 1958. Apud. Chemical Abstract, 53, 3658c, 10 jan., 25 fey., 1959.

TROSSERO, M.A. Analisis de parametros de pirolisis de biomassa. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnologia Industrial, 1981. 14 p.

VALENTE, O.F.; ALMEIDA, J.M.; VITAL, B.R. & DELLA LÚCIA, R. M. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. *Revista Árvore*, Viçosa, 9(1): 28-39, 1985.

WENZL, H.F.J. The chemical technology of wood. New York, Academic Press, 1970. 692 p.

ZHUKOV, V.R.; GRECHKO, K. & TSERLYUKEVICH, Ya. An investigation of the thermal properties of peat wax and some its components. *Khimiya Tverdogo Topliva*, 14(4):85-90, 1980.

A P Ê N D I C E

TABELA 24. Resultados de rendimento gravimétrico dos produtos da pirólise da turfa.

Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Repetição	Rendimento gravimétrico (%)		
				Carvão turfa	Voláteis condensáveis	Voláteis não condensáveis
300	1	30	1	91,02	4,32	4,66
300	1	30	2	90,80	4,20	5,00
300	1	90	1	86,07	7,52	6,41
300	1	90	2	84,58	7,60	7,82
300	3	30	1	89,73	6,93	3,34
300	3	30	2	90,22	6,15	3,65
300	3	90	1	85,58	8,30	6,12
300	3	90	2	86,32	7,48	6,20
300	5	30	1	84,25	7,20	8,55
300	5	30	2	86,30	6,45	7,25
300	5	90	1	83,43	8,36	8,21
300	5	90	2	83,32	8,66	8,02
450	1	30	1	66,72	16,72	16,56
450	1	30	2	63,83	17,35	18,82
450	1	90	1	60,45	20,52	19,03
450	1	90	2	60,62	20,70	18,68
450	3	30	1	63,40	19,58	17,02
450	3	30	2	63,03	18,95	18,02
450	3	90	1	60,55	21,03	18,42
450	3	90	2	60,25	21,20	18,55
450	5	30	1	63,30	18,23	18,47
450	5	30	2	62,43	18,55	19,02
450	5	90	1	61,00	22,47	16,53
450	5	90	2	60,94	22,24	16,82
600	1	30	1	51,40	23,18	25,42
600	1	30	2	50,85	24,18	24,95
600	1	90	1	50,85	23,91	25,24
600	1	90	2	50,95	23,98	25,07
600	3	30	1	51,15	23,07	25,78
600	3	30	2	52,67	24,10	23,23
600	3	90	1	51,66	23,92	24,24
600	3	90	2	51,65	24,40	23,95
600	5	30	1	52,50	22,08	25,42
600	5	30	2	52,72	23,90	23,38
600	5	90	1	51,55	24,38	24,07
600	5	90	2	51,75	22,65	25,60
750	1	30	1	49,56	27,90	22,54
750	1	30	2	48,70	26,62	24,68
750	1	90	1	47,93	25,93	26,14
750	1	90	2	48,30	26,67	25,03
750	3	30	1	47,37	25,88	26,75
750	3	30	2	47,08	26,07	26,85
750	3	90	1	46,62	27,30	26,08
750	3	90	2	45,72	27,98	26,30
750	5	30	1	47,20	25,68	27,15
750	5	30	2	47,15	25,62	27,13
750	5	90	1	47,02	24,23	28,75
750	5	90	2	47,40	24,73	27,87
900	1	30	1	45,35	27,12	27,53
900	1	30	2	44,57	27,72	27,71
900	1	90	1	45,50	27,50	27,00
900	1	90	2	45,25	25,05	29,70
900	3	30	1	45,65	23,15	31,20
900	3	30	2	45,77	23,10	31,13
900	3	90	1	45,69	24,35	29,96
900	3	90	2	45,67	24,13	30,20
900	5	30	1	45,65	21,60	32,75
900	5	30	2	45,70	21,42	32,88
900	5	90	1	45,52	21,05	33,43
900	5	90	2	45,28	21,17	33,53

TABELA 25. Análise de variância para rendimento gravimétrico em carvão de turfa.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	13827,4193	3456,8548	9431,09**
Taxa aquecimento (B)	2	9,0619	4,5310	12,36**
Tempo permanência (C)	1	39,4795	39,4795	107,71**
Interação A x A	8	41,8839	5,2355	14,28**
Interação A x C	4	36,5333	9,1333	24,92**
Interação B x C	2	3,8021	1,9010	5,19*
Interação A x B x C	8	8,6058	1,0757	2,93*

(Tratamentos)	29	13966,7858	481,6133	1313,95**
Resíduo	30	10,99615	0,3665	

Total	59	13977,7820		

Coeficientes de variação (%) = 1,03

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 26. Análise de variância para rendimento gravimétrico de voláteis condensáveis.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	2859,3903	714,8483	2046,17**
Taxa aquecimento (B)	2	9,9728	4,9864	14,27**
Tempo permanência (C)	1	17,5176	17,5176	50,14**
Interação A x B	8	73,1527	9,1441	26,17**
Interação A x C	4	26,0007	6,5002	18,61**
Interação B x C	2	0,4151	0,2076	0,59ns
Interação A x B x C	8	11,9612	1,4951	4,28*

(Tratamentos)	29	2998,4133	103,3936	295,95**
Resíduo	30	10,4808	0,3494	

Total	59	3008,8941		

Coeficiente de variação (%) = 2,94

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 27. Análise de variância para rendimento gravimétrico
em voláteis não condensáveis.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	4311,0706	1077,767	1703,27**
Taxa aquecimento (B)	2	36,9306	18,4653	29,18**
Tempo permanência (C)	1	4,3470	4,3470	6,87*
Interação A x B	8	59,2793	7,4099	11,71**
Interação A x C	4	6,7228	1,680	2,66ns
Interação B x C	2	3,6573	1,8288	2,89ns
Interação A x B x C	8	12,3815	1,5477	2,45*

(Tratamentos)	29	4434,3891	152,9000	241,65**
Resíduo	30	18,9829	0,6327	

Total	59	4453,3720		

Coeficiente de variação (%) = 3,76

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 28. Granulometria da turfa.

Repetição	% acima de 10 mm
1	18,14
2	30,02
3	32,12
4	28,35
5	25,42
6	34,27
7	29,78
8	27,58
9	18,90
10	30,82
11	27,41
12	31,37
13	29,94
14	33,12
15	26,08
16	28,27
17	26,89
18	24,63
19	23,71
20	26,78
Média	27,63
Coeficiente de variação (%)	15,27

TABELA 29. Resultados de granulometria do carvão de turfa e taxa de redução granulométrica.

Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo na temperatura final (min)	Repetição	Granulometria (% > 10 mm)	Taxa de redução granulométrica (%)
300	1	30	1	11,29	59,05
300	1	30	2	15,37	44,25
300	1	90	1	13,25	51,94
300	1	90	2	9,06	67,14
300	3	30	1	17,83	35,33
300	3	30	2	23,81	13,63
300	3	90	1	15,33	44,40
300	3	90	2	23,66	14,18
300	5	30	1	21,59	21,69
300	5	30	2	22,62	17,95
300	5	90	1	23,66	14,18
300	5	90	2	24,53	11,03
450	1	30	1	17,11	37,93
450	1	30	2	11,17	59,48
450	1	90	1	12,81	53,53
450	1	90	2	8,88	67,79
450	3	30	1	16,14	41,45
450	3	30	2	15,19	44,90
450	3	90	1	16,03	39,11
450	3	90	2	11,07	59,84
450	5	30	1	17,39	36,92
450	5	30	2	12,18	55,82
450	5	90	1	11,66	57,70
459	5	90	2	8,89	67,75
600	1	30	1	11,68	57,63
600	1	30	2	14,73	46,57
600	1	90	1	13,95	49,40
600	1	90	2	13,16	52,26
600	3	30	1	16,57	39,89
600	3	90	2	19,19	30,39
600	3	90	1	15,00	45,59
600	3	90	2	20,05	27,27
600	5	30	1	19,13	30,61
600	5	30	2	15,72	42,98
600	5	90	1	20,21	26,69
600	5	90	2	19,22	30,28
750	1	30	1	12,79	53,60
750	1	30	2	9,23	66,52
750	1	90	1	12,45	54,84
750	1	90	2	10,32	62,56
750	3	30	1	13,50	51,03
750	3	30	2	14,64	46,89
750	3	90	1	14,74	46,53
750	3	90	2	12,35	55,20
750	5	30	1	18,47	33,00
750	5	30	2	19,60	28,90
750	5	90	1	17,31	37,21
750	5	90	2	20,20	26,73
900	1	30	1	12,40	55,02
900	1	30	2	14,81	46,28
900	1	90	1	9,50	65,54
900	1	90	2	11,61	57,88
900	3	30	1	20,24	26,58
900	3	30	2	14,76	46,46
900	3	90	1	16,33	40,76
900	3	90	2	18,11	34,31
900	5	30	1	18,77	31,91
900	5	30	2	20,32	26,30
900	5	90	1	18,12	34,27
900	5	90	2	24,78	10,11

TABELA 30. Análise de variância¹ para taxa de redução granulométrica da turfa.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	0,30394467	0,0759861	6,69**
Taxa aquecimento (B)	2	0,61692229	0,3084611	27,17**
Tempo permanência (C)	1	0,01031917	0,0103192	0,91ns
Interação A x B	8	0,25242757	0,0315534	2,78*
Interação A x C	4	0,03197810	0,0039945	0,70ns
Interação B x C	2	0,01165127	0,0058256	0,51ns
Interação A x B x C	8	0,03518834	0,0043985	0,39ns

(Tratamentos)	29	1,26243142	0,04353212	3,89**
Resíduo	30	0,34063050	0,01135435	

Total	59	1,60306192		

Coeficiente de variação (%) = 15,14 .

¹ Obtida de dados transformados em arc seno $\sqrt{x/100}$

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 31. Resultados do experimento para densidade e porosidade do carvão de turfa.

300	1	30	1	1,50	475	68,24
300	1	30	2	1,49	507	65,98
300	1	90	1	1,54	492	68,06
300	1	90	2	1,53	446	70,85
300	3	30	1	1,48	484	67,30
300	3	30	2	1,45	508	64,97
300	3	90	1	1,40	522	64,73
300	3	90	2	1,50	541	63,94
300	5	30	1	1,41	506	64,11
300	5	30	2	1,46	492	66,31
300	5	90	1	1,47	476	67,62
300	5	90	2	1,46	518	64,53
450	1	30	1	1,45	512	64,69
450	1	30	2	1,54	490	68,19
450	1	90	1	1,50	569	62,07
450	1	90	2	1,60	538	66,38
450	3	30	1	1,49	576	61,35
450	3	30	2	1,60	494	69,13
450	3	90	1	1,54	589	61,76
450	3	90	2	1,56	543	65,20
450	5	30	1	1,58	524	66,84
450	5	30	2	1,57	590	62,43
450	5	90	1	1,59	515	67,62
450	5	90	2	1,59	512	67,80
600	1	30	1	1,79	654	65,40
600	1	30	2	1,74	571	66,03
600	1	90	1	1,76	631	64,15
600	1	90	2	1,74	614	64,72
600	3	30	1	1,72	580	66,28
600	3	30	2	1,75	562	67,89
600	3	90	1	1,75	621	64,52
600	3	90	2	1,70	591	65,24
600	5	30	1	1,82	604	66,82
600	5	30	2	1,77	659	62,77
600	5	90	1	1,76	533	69,72
600	5	90	2	1,78	560	68,54
750	1	30	1	1,78	598	66,41
750	1	30	2	1,75	660	62,29
750	1	90	1	1,82	636	65,06
750	1	90	2	1,79	618	65,48
750	3	30	1	1,74	592	65,98
750	3	30	2	1,73	619	64,22
750	3	90	1	1,70	601	64,65
750	3	90	2	1,79	653	63,52
750	5	30	1	1,73	624	63,93
750	5	30	2	1,78	618	65,29
750	5	90	1	1,80	602	66,56
750	5	90	2	1,79	631	64,75
900	1	30	1	1,83	772	57,82
900	1	30	2	1,73	803	53,59
900	1	90	1	1,83	817	55,36
900	1	90	2	1,93	805	57,78
900	3	30	1	2,02	811	61,75
900	3	30	2	2,04	734	64,02
900	3	90	1	2,14	816	60,47
900	3	90	2	2,07	647	69,05
900	5	30	1	2,03	634	68,77
900	5	30	2	1,96	680	65,31
900	5	90	1	2,01	627	68,81
900	5	90	2	2,04	721	64,66

TABELA 32. Análise de variância para densidade verdadeira do carvão.

Causa da variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	1,8783	0,469	253,14**
Taxa aquecimento (B)	2	0,0139	0,0069	3,74*
Tempo permanência (C)	1	0,0070	0,0070	3,80ns
Interação A x B	8	0,1625	0,0158	10,95**
Interação A x C	4	0,0130	0,0032	1,75ns
Interação B x C	2	0,0012	0,0006	0,32ns
Interação A x B x C	8	0,0056	0,0007	0,38ns

(Tratamentos)	29	2,0815	0,0718	39,69**
Resíduo	30	0,0556	0,0018	

Total	59	2,1372		

Coeficiente de variação (%) = 2,52

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 33. Análise de variância para densidade aparente do carvão.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrado	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	421420,7667	105355,1917	65,95**
Taxa aquecimento (B)	2	10467,7333	5233,8666	3,28ns
Tempo permanência (C)	1	86,4000	86,4000	0,05ns
Interação A x B	8	35187,9333	4398,4917	2,75*
Interação A x C	4	1526,1000	381,5250	0,24ns
Interação B x C	2	5230,0000	2615,0000	1,64ns
Interação A x B x C	8	11229,0000	1403,6250	0,88ns

(Tratamentos)	29	485147,9333	16729,2390	10,47**
Resíduo	30	47924,0000	1597,4666	

Total	59	533071,9333		

Coeficiente de variação (%) = 6,66

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 34. Análise de variância para porosidade do carvão de turfa.

Causa de variação	G.L.	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	125,3365.	31,3341.	5,59**
Taxa aquecimento (B)	2	50,4120	25,2060	4,49*
Tempo permanência (C)	1	1,4695	1,4595	0,26ns
Interação A x B	8	231,5220.	28,9402	5,16**
Interação A x C	4	1,9351	0,4837.	0,09ns
Interação B x C	2	19,664	9,8323	1,75ns
Interação A x B x C	8	36,2635.	4,5329	0,81ns

(Tratamentos)	29	466,6034.	16,0897	2,87**
Resíduo	30	168,2271	5,6075	

Total	59	634,8305		

Coeficiente de variação (%) = 3,64

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 35. Resultados do experimento para poder calorífico superior e composição química do carvão de turfa.

Temperatura	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de permanência (min)	Repetição	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Teor matérias voláteis (%)	Teor cinzas (%)	Teor carbono fixo (%)
300	1	30	1	5117,0	51,44	20,08	28,48
300	1	30	2	4971,7	47,56	20,75	31,69
300	1	90	1	5078,8	45,51	24,37	30,12
300	1	90	2	5137,3	45,07	23,55	31,38
300	3	30	1	5064,6	45,91	24,27	29,82
300	3	30	2	5304,3	47,28	22,43	30,29
300	3	90	1	5176,2	46,75	20,59	32,16
300	3	90	2	5343,8	46,59	20,86	32,55
300	5	30	1	5119,8	45,85	20,53	33,62
300	5	30	2	5156,6	44,70	23,91	31,39
300	5	90	1	5185,8	46,47	18,70	34,83
300	5	90	2	5112,7	43,54	23,02	33,44
450	1	30	1	5515,6	33,36	22,26	44,38
450	1	30	2	5488,1	31,64	23,92	44,49
450	1	90	1	5914,0	25,45	32,33	42,42
450	1	90	2	5911,1	25,07	30,35	44,57
450	3	30	1	5451,3	28,05	31,09	40,81
450	3	30	2	5823,1	26,58	29,17	44,25
450	3	90	1	5734,1	27,55	27,11	45,34
450	3	90	2	5578,0	25,68	25,28	49,04
450	5	30	1	5857,3	27,16	24,79	48,05
450	5	30	2	5772,8	28,44	23,48	48,08
450	5	90	1	5458,2	23,50	29,47	47,03
450	5	90	2	6075,3	23,56	34,17	42,17
600	1	30	1	6466,2	11,16	36,58	52,26
600	1	30	2	6305,5	15,39	37,52	47,09
600	1	90	1	6889,1	10,99	36,48	52,55
600	1	90	2	6880,4	13,09	29,10	57,83
600	3	30	1	6590,8	13,30	25,30	61,40
600	3	30	2	6408,2	16,40	28,54	55,06
600	3	90	1	6470,0	14,96	27,50	57,54
600	3	90	2	6994,6	13,03	35,14	51,83
600	5	30	1	6435,6	16,16	30,27	53,87
600	5	30	2	5836,5	14,65	31,62	53,73
600	5	90	1	6842,5	13,53	30,98	55,49
600	5	90	2	6521,2	13,89	29,32	55,79
750	1	30	1	6266,1	7,83	36,90	55,27
750	1	30	2	6643,6	7,39	42,40	50,21
750	1	90	1	6879,7	8,60	38,15	53,25
750	1	90	2	6283,0	6,88	38,54	54,58
750	3	30	1	6850,2	9,80	37,35	52,85
750	3	30	2	6588,4	7,17	40,74	52,09
750	3	90	1	6644,8	7,14	38,05	54,81
750	3	90	2	6833,1	7,09	38,32	54,59
750	5	30	1	7268,7	6,90	39,73	57,37
750	5	30	2	6680,5	7,17	31,30	61,53
750	5	90	1	6810,1	6,75	36,00	57,25
750	5	90	2	6735,2	6,89	37,39	55,72
900	1	30	1	6581,7	4,98	39,90	55,52
900	1	30	2	6832,8	5,10	39,28	55,62
900	1	90	1	6829,0	3,92	37,48	58,60
900	1	90	2	6892,1	3,56	36,92	59,52
900	3	30	1	6664,7	3,94	41,53	54,53
900	3	30	2	6212,9	4,33	39,04	56,63
900	3	90	1	6803,4	3,37	32,73	63,90
900	3	90	2	6628,3	3,84	32,54	63,62
900	5	30	1	6833,7	3,53	33,80	62,67
900	5	30	2	6441,4	3,92	35,54	60,54
900	5	90	1	6761,3	3,00	36,51	60,49
900	5	90	2	6865,1	3,60	34,80	61,60

TABELA 36. Análise de variância para poder calorífico superior do carvão de turfa.

Causa da variação	G.L.	Soma de quadrado	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	23416673,476	5854168,369	119,94**
Taxa aquecim. (B)	2	29716,087	14858,043	0,30ns
Tempo perman. (C)	1	340340,953	340340,953	6,97*
Interação A x B	8	501150,383	62643,797	1,28ns
Interação A x C	4	301415,240	75353,810	1,54ns
Interação B x C	2	49988,811	24994,405	0,51ns
Interação A x B x C	8	189221,032	23652,629	0,48ns

(Tratamentos)	29	24828505,983	856155,378	17,84**
Resíduo	30	1464277,925	48809,264	

Total	59	26292783,908		

Coeficiente de variação (%) = 3,59

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 37. Análise de variância para teor de matérias voláteis do carvão.

Causa da variação	G.L.	Soma de quadrado	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	14394,0987	3598,5246	2441,86**
Taxa aquecim. (B)	2	10,1051	5,2525	3,56*
Tempo perman. (C)	1	37,1614	37,1614	25,22**
Interação A x B	8	34,7979	4,3497	2,95*
Interação A x C	4	24,9983	6,2495	4,24**
Interação B x C	2	11,6431	5,2815	3,95*
Interação A x B x C	8	22,9154	2,8644	1,94ns

(Tratamentos)	29	14536,1209	501,2455	340,13**
Resíduo	30	44,2105	1,4737	

Total	59	14580,3312		

Coeficiente de variação (%) = 6,14

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 38. Análise de variância para teor de cinzas do carvão de turfa.

Causa da variação	G.L.	Soma de quadrado	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	2073,2111	518,3027	94,57**
Taxa aquecim. (B)	2	45,5354	22,7676	4,15*
Tempo perman. (C)	1	0,0499	0,0498	0,01ns
Interação A x B	8	71,3832	8,9229	1,63ns
Interação A x C	4	75,8121	18,9530	3,46*
Interação B x C	2	37,5116	18,7558	3,42*
Interação A x B x C	8	157,7191	19,7148	3,60*

(Tratamentos)	29	2461,2224	84,8697	15,49**
Resíduo	30	164,4136	5,4804	

Total	59	2625,63602		

Coeficiente de variação (%) = 7,51

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

TABELA 39. Análise de variância para teor de carbono fixo do carvão de turfa.

Causa da variação	G.L.	Soma de quadrado	Quadrado médio	F
Temperat. final (A)	4	5897,7120	1474,4280	341,27**
Taxa aquecim. (B)	2	104,3005	52,1502	12,07**
Tempo perman. (C)	1	27,7032	27,7032	6,41*
Interação A x B	8	44,6627	5,5828	1,29ns
Interação A x C	4	25,7967	6,4491	1,49ns
Interação B x C	2	32,5153	16,2576	3,46*
Interação A x B x C	8	98,4262	12,3032	2,85*

(Tratamentos)	29	6233,1166	214,8660	47,73**
Resíduo	30	129,6106	4,3203	

Total	59	6360,7272		

Coeficiente de variação (%) = 4,23

ns = não significativo

* = significativo ao nível de 5% de probabilidade

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade