

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA TAXA DE AQUECIMENTO DA CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL DE *Eucalyptus*

*Influence of Temperature and Carbonization Heating Rate on the Properties of Eucalyptus Charcoal*

Paulo Cesar da Costa Pinheiro<sup>2</sup>, Francisco José Figueiredo<sup>3</sup> e Omar Seye<sup>4</sup>

**Resumo:** A biomassa aquecida acima de 200 °C, na ausência de ar, tem uma decomposição termal (carbonização), gerando gases, vapor e um resíduo sólido (carvão). Muitos fatores influenciam a produção de carvão: as propriedades físico-químicas, o tamanho e a forma da madeira, o conteúdo de água, a taxa de aquecimento, a pressão externa etc. Normalmente a carbonização é realizada entre 400 e 500 °C, e a temperatura tem muita influência na qualidade e quantidade do carvão produzido. Este trabalho apresenta as análises da influência da taxa de aquecimento de carbonização nas propriedades do carvão de eucalipto. Os testes foram realizados em uma balança macrotérmica, sob uma atmosfera autogerada, com taxas de aquecimento de 1; 2,5; 5; 10; 20; e 50 °C min<sup>-1</sup> e a temperatura final de carbonização de 500 °C.

**Palavras-chave:** Carvão, biomassa, eucalipto, cinética química e temperatura de carbonização.

**Abstract:** Biomass heated over 200 °C in the absence of air presents a thermal decomposition (carbonization), generating gases, vapor and solid residue (charcoal). Many factors influence charcoal production: chemical-physical properties, wood size and shape, water content, heating rate, external pressure, etc. Normally, carbonization is carried out in the range 400-500 °C, and temperature has a high influence on the quality and quantity of the charcoal produced. This work presents the analysis of the influence of carbonization heating rate on the properties of eucalyptus charcoal. The tests were carried out using a macro thermal scale, under self-generated atmosphere, with heating rates of 1, 2.5, 5, 10, 20 and 50 °C min<sup>-1</sup> and carbonization final temperature of 500 °C.

**Keywords:** Charcoal, biomass, eucalyptus, chemical kinetics, and carbonization temperature.

## 1 INTRODUÇÃO

A diminuição das reservas de combustíveis fósseis e a preocupação com o meio ambiente têm valorizado o uso de fontes

renováveis de energia. O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo (8,66 Mton, 2003), sendo este utilizado principalmente nas indústrias de aço, ferro-gusa e aço (82%, 7,1 Mton).

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 25.5.2006 e aceito em 23.6.2006.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG, <pinheiro@netuno.lcc.ufmg.br>. <sup>3</sup> Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos UFSJ, Praça Frei Orlando, 170, 36300-000 São João del Rei, MG, <fjf@ufs.edu.br>. <sup>4</sup> Departamento de Eletricidade da UFAM, Av. Gen. Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 3000, 69077-000 Manaus-AM, <omar\_seye@hotmail.com>.

Apesar de o carvão vegetal ser utilizado desde os primórdios da civilização, ainda é pequeno o conhecimento sobre os mecanismos de cinética química e de transferência de calor e massa que ocorrem no interior da biomassa durante a carbonização. É muito importante conhecer os parâmetros do processo de carbonização e o modo como eles influenciam o desempenho dos fornos de carbonização e a qualidade do carvão produzido, de modo a aumentar o rendimento do processo de carbonização.

## 2 RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DA CARBONIZAÇÃO

No Brasil, a lenha e o carvão vegetal são normalmente comercializados em unidades de volume, e o rendimento da carbonização é avaliado através do índice de conversão IC (Quadro 1):

$$IC = \frac{V_{madeira}}{V_{carvão}}$$

em que  $V_{madeira}$  é o volume de madeira utilizado (estéreo) e  $V_{carvão}$  o volume de carvão vegetal produzido (mdc, m<sup>3</sup>).

O estéreo ou estere real é uma unidade de medida de volume que engloba a altura, a profundidade e a largura da madeira empilhada, incluindo os espaços vazios entre as

peças de madeira (1 st = 1 m<sup>3</sup> de madeira empilhada). A medição é feita no campo, com uma trena ou vara graduada. Ao medir o volume total, e não o volume do sólido, o estéreo considera, além da madeira, os espaços vazios entre as toras de madeira. Assim, a quantidade (peso) de madeira no estéreo depende do método de empilhamento, da densidade da madeira, do diâmetro, comprimento e forma das estacas etc. Uma vez que todos estes fatores variam consideravelmente, a precisão da quantidade de madeira contida no estéreo é bastante aproximada, e depende do número de variáveis que podem ser controladas. Por isto, a Portaria Técnica INMETRO n<sup>o</sup> 97 (DOU 09/08/1999) proíbe, a partir de 01/01/2010, a utilização do estéreo nas operações que envolvem a comercialização de madeira roliça.

A massa de carvão vegetal contida no m<sup>3</sup> de carvão (mdc) pode ser estimada a partir da densidade a granel do carvão, mas também está sujeita a um grande erro, devido à medição aproximada do volume e da variabilidade da densidade do carvão.

Os erros na estimação das quantidades de madeira utilizada e do carvão produzido e as grandes mudanças das propriedades físico-químicas que ocorrem durante o processo de carbonização fazem com que a avaliação do rendimento da carbonização através do índice de conversão não permita analisar com

**Quadro 1** – Quadro de conversão estéreo para massa e volume *Eucalyptus* e *Pinus* (kg,m<sup>3</sup>,st)  
**Table 1** – Stereo conversion table for *Eucalyptus* and *Pinus* mass and volume (kg,m<sup>3</sup>,st)

Espécie	Estéreo (st)	Produto	Massa		Volume			
			(kg)	(%)	(st)	(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)
<i>Eucalyptus</i>	1	Madeira	577,6	95	0,87	87	0,61	87
		Casca	30,4	5	0,13	13	0,09	13
		Total	608,0	100	1,00	100	0,70	100
<i>Pinus</i>	1	Madeira	545,2	94	0,82	82	0,57	82
		Casca	34,8	6	0,18	18	0,13	18
		Total	580,0	100	1,00	100	0,70	100

Fonte: BRACELPA.

confiança a influência dos diversos parâmetros envolvidos no processo de carbonização.

A eficiência do processo de carbonização da biomassa é mais bem representada pelo rendimento gravimétrico, ou taxa de conversão de carvão  $\eta_{\text{carvão}}$ , definido por:

$$\eta_{\text{carvão}} = \frac{M_{\text{carvão}}}{M_{\text{biomassa}}} \times 100$$

em que  $M_{\text{carvão}}$  é a massa seca de carvão vegetal produzido (kg) e  $M_{\text{biomassa}}$  a massa de biomassa seca (estufa) utilizada (kg).

Utilizando a massa (peso) da biomassa em vez do seu volume, elimina-se a influência de variáveis como densidade, tamanho e forma da lenha. Com a massa de lenha seca na estufa determina-se a quantidade real de biomassa disponível para produção de carvão, eliminando-se a massa de água existente na lenha verde.

A avaliação da carbonização pelo rendimento gravimétrico, apesar de ser a mais recomendável, não é perfeita, pois não contempla o grau de transformação da carbonização. O carvão vegetal não é um composto químico definido. Alguns carvões são quase carbono puro, enquanto outros sofreram um processo parcial de carbonização, contendo quantidades significativas de oxigênio e hidrogênio.

### 3 ANÁLISE TÉRMICA

Chama-se análise térmica as técnicas onde os parâmetros físicos da amostra são analisados, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura. A análise térmica é uma ferramenta simples, que permite analisar e compreender problemas que envolvem reações químicas ou físicas e seus mecanismos em função da temperatura.

A termogravimetria (TG) baseia-se na medição contínua do peso de uma amostra

durante o processo de aquecimento. Normalmente uma substância perde massa com o aquecimento, devido à perda de umidade, voláteis, reações de pirólise e combustão. Através dos resultados obtidos com a termogravimetria, é possível acompanhar detalhadamente o processo, determinando o ponto de ignição, os teores de umidade, os voláteis, o carbono fixo e as cinzas, além de obter informações a respeito da estabilidade térmica.

A termogravimetria pode ser realizada em atmosfera oxidante (ar ou oxigênio), podendo-se chegar à combustão, restando somente cinzas no final do processo. Ela também pode ser realizada em atmosfera inerte ( $N_2$  ou  $CO_2$ ). Neste caso há o desprendimento de umidade e voláteis, além de possíveis reações químicas e físicas. Um exemplo é o processo de carbonização da madeira estudado no presente trabalho.

A termogravimetria derivada (DTG) é o método em que se obtém a primeira derivada da massa em função do tempo ( $dm/dt$ ), ou temperatura ( $dm/dT$ ). Além de fornecer a velocidade de variação da massa, é possível analisar o início e o fim de cada etapa ocorrida no processo.

A velocidade de reação de carbonização é representada pela taxa de reação mássica (g/g.s):

$$\rho_m(t) = - \frac{1}{m_c(t)} \frac{dm_c(t)}{dt}$$

em que  $m_c(t)$  e  $dm_c(t)/dt$  representam, respectivamente, a massa e a derivada no instante considerado.

Estudos preliminares (PINHEIRO; RESENDE; YOSHIDA, 1995) determinaram os parâmetros cinéticos da combustão e da carbonização de seis espécies de eucalipto cultivadas no território brasileiro, através de análises termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG). Os ensaios de carbonização foram realizados em uma

termobalança Mettler TA4000 entre 25 e 500 °C, com uma taxa de 10 °C min<sup>-1</sup>, em atmosfera de nitrogênio ultrapuro a uma vazão de 130 mL min<sup>-1</sup> e massa da amostra entre 15,425 mg e 15,989 mg. Os resultados obtidos estão na Figura 1.

Note-se nas curvas TG que o início da liberação de voláteis ocorre para todas as amostras, a uma temperatura de aproximadamente 175 °C. As curvas DTG de carbonização da madeira apresentam apenas um pico de derivada máxima a 354 °C em todas as amostras. As curvas DTG dos vários ensaios de carbonização dos eucaliptos praticamente se superpõem, não havendo, portanto, diferenças significativas entre as amostras testadas.

#### 4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Inicialmente, para testar a influência da temperatura nas propriedades do carvão vegetal, foi analisada uma bancada de testes de carbonização. A retorta piloto de carbonização foi fabricada em aço inoxidável 310 na forma cilíndrica (60 mm de diâmetro interno e 160 mm de profundidade). Ela possui duas aberturas na tampa superior, para saída de gases e para entrada de termopares. A retorta foi colocada no interior de uma mufla (Quimis, modelo Q.318D24), onde foi aquecida até a temperatura de ensaio. O sistema de controle regula a temperatura de operação da mufla (e do ensaio), e um termopar introduzido dentro da retorta determina a temperatura real do ensaio.

Para os ensaios foram utilizadas amostras de *Eucalyptus Camaldulensis*, *Cloeziana* e *Citriodora*, com idades entre 6,5 e 7,5 anos e diâmetro aproximado de 30 mm, provenientes dos plantios da Mafla. A escolha das amostras para corpos-de-prova foi feita através de análise visual preliminar, evitando-se as amostras com rachaduras, fendas e nós. As amostras foram cortadas em forma de corpos-de-provas cilíndricos de 75 mm de comprimento, utilizando-se uma serra de fita.

Evitou-se o aquecimento da madeira, de modo a não provocar a modificação de suas propriedades físico-químicas. As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105 °C durante 48 horas.

As amostras a serem carbonizadas foram colocadas na retorta, sendo esta colocada na mufla e aquecida até à temperatura de ensaio desejada. Foram realizados testes na faixa de 200 a 650 °C, em intervalos de 50 em 50 °C. Alcançada essa temperatura, manteve-se a mufla ligada durante 10 horas, de modo a assegurar a carbonização completa da amostra. Os ensaios de carbonização foram realizados em atmosfera autogerada, com os próprios gases liberados na carbonização, simulando as condições que ocorrem nos processos industriais de carbonização. Após a carbonização deixou-se a retorta resfriar, até a temperatura ambiente.

Na Figura 2 estão os rendimentos gravimétricos em função da temperatura final de carbonização. Pode-se notar que o rendimento da carbonização diminui com o aumento da temperatura. Esse rendimento varia bastante na faixa de 200 a 400 °C e estabiliza-se a partir de 400 °C, em torno de 30%. Nota-se também que não existe grande diferença entre os resultados obtidos para as espécies de *Eucalyptus* estudadas.

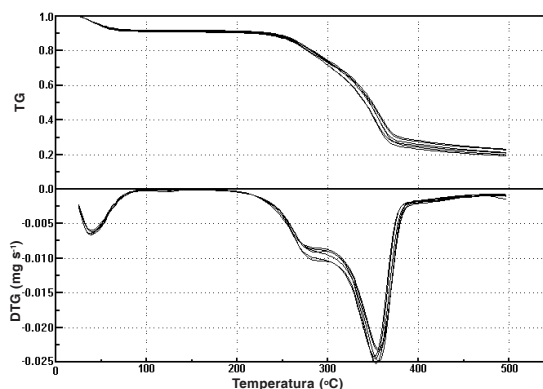
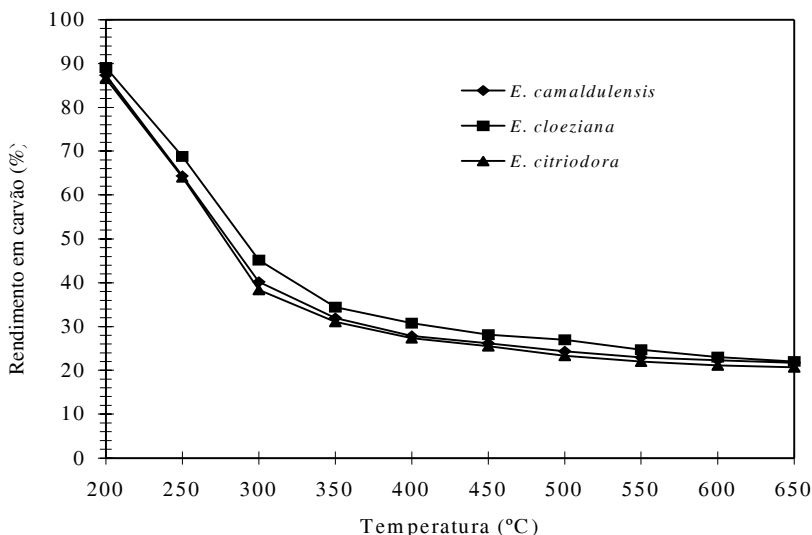


Figura 1 - Curvas TG/DTG da carbonização do *Eucalyptus*.

Figure 1 - TG/DTG curves of *Eucalyptus* carbonization.



**Figura 2** – Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de carbonização.  
**Figure 2** – Gravimetric yield in vegetal charcoal in function of final carbonization temperature.

As Figuras 3 e 4 apresentam as análises termogravimétricas (TG e DTG) da madeira de *Eucalyptus Camaldulensis* e dos diversos carvões obtidos na retorta de carbonização a diferentes temperaturas. As análises foram realizadas em uma termobalança Mettler TA4000, entre 25 e 700 °C, com uma taxa de 10 °C/min, em atmosfera de ar artificial a uma vazão de 130 mL min<sup>-1</sup>. Na Figura 3 a DTG mostra a existência de dois picos: o primeiro na faixa de 200 a 380 °C, correspondente às reações de decomposição da celulose e da hemicelulose, e o segundo de 380 a 550 °C, correspondente à decomposição da lignina (CHAUVETTE et al., 1985).

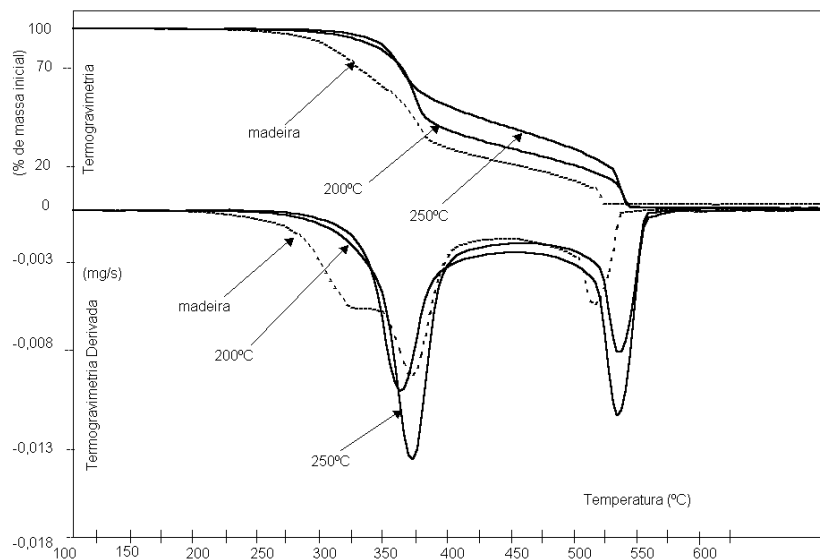
A curva da análise térmica da madeira original (*Eucalyptus camaldulensis*) mostrou um pico a 290 °C, representativo da decomposição da hemicelulose. Nas DTG dos carvões produzidos a 200 e 250 °C não existe mais a presença desse pico, o que significa que houve a degradação térmica da hemicelulose durante o processo de carbonização. O produto obtido nessa faixa de temperaturas pode ser mais bem caracterizado como tiço ou madeira torrificada.

Nos carvões obtidos com temperaturas finais de carbonização entre 300 e 600 °C (Figura 4) a DTG não apresenta o pico em 290 °C, o que significa que nos processos de carbonização os primeiros componentes da madeira que se decompõem são a hemicelulose e a celulose. A não-superposição das curvas (TG e DTG) significa a existência de diferenças significativas entre os carvões produzidos a diferentes temperaturas finais de carbonização.

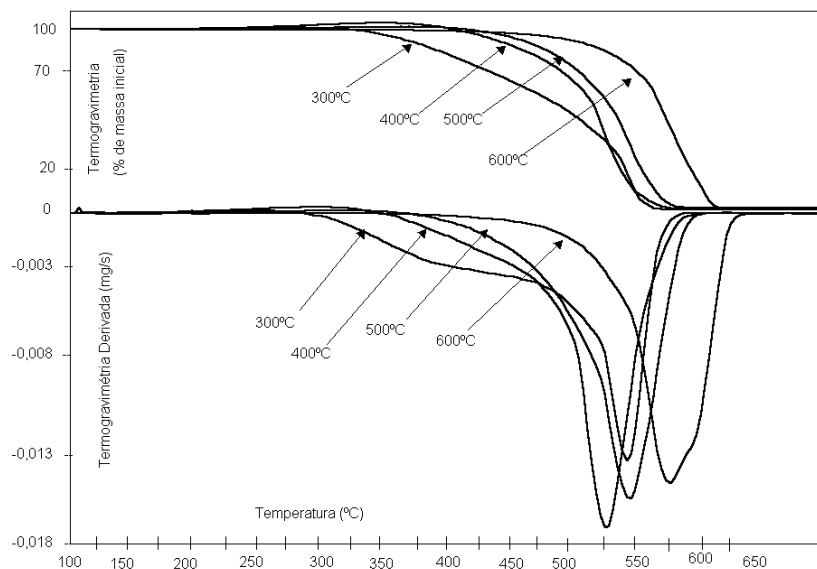
Goldstein (1977) mostrou que o comportamento térmico da madeira reflete a soma das respostas térmicas de seus três principais componentes: hemicelulose, celulose e lignina. Destes, a hemicelulose e a celulose (cerca de 70% da composição da madeira) são os componentes menos estáveis e se degradam entre 225 e 375 °C. Portanto, pode-se deduzir que a perda acentuada de massa é devido à degradação desses dois componentes. A lignina é mais estável e se degrada de modo mais lento, sendo o principal responsável pela formação do carvão vegetal. Para temperaturas inferiores a 375 °C o rendimento em gases condensáveis varia em função

da temperatura, devido à estabilidade térmica dos componentes da madeira, que na decomposição irão constituir os gases condensáveis. Acima de 450 °C pode-se afirmar

que a formação de gases condensáveis é desprezível, pois nessa temperatura a lignina atinge seu pico máximo de decomposição.



**Figura 3** – TG e DTG da madeira de *Eucalyptus Camaldulensis* e dos carvões obtidos a 200 e 250 °C.  
**Figure 3** – TG and DTG of *Eucalyptus Camaldulensis* wood and from charcoals obtained at 200 and 250 °C.



**Figura 4** – TG e DTG dos carvões de *Eucalyptus camaldulensis* obtidos entre 300 e 600 °C.  
**Figure 4** – TG and DTG of *Eucalyptus Camaldulensis* obtained from 300 and 600 °C.

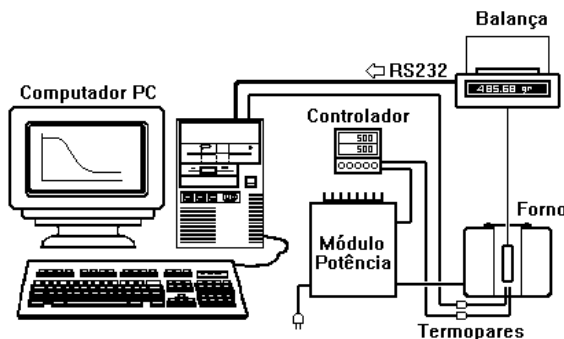


## 5 DESENVOLVIMENTO DE UMA MACROTHERMOBALANÇA

A fim de analisar alguns fenômenos que ocorrem durante a carbonização e combustão da biomassa, e que não podem ser analisados em uma termobalança convencional (condução de calor na amostra, a liberação dos gases formados, identificação de reações endotérmicas e exotérmicas ocorridas durante a carbonização), foi construída uma macrotermobalança.

A Figura 5 mostra um diagrama esquemático da macrotermobalança construída. A balança utilizada na construção da macrotermobalança foi uma balança marca Ohaus, Modelo CT200 (202 g x 0,01 g), de precisão  $\pm 0,01$  g. Essa balança possui um dispositivo de sustentação da amostra por baixo do prato e uma porta serial RS232, de modo a permitir a transmissão dos dados de pesagem a um microcomputador PC. O microcomputador faz a aquisição dos dados, o tratamento matemático e os gráficos. A comunicação dos dados entre a balança e o computador foi realizada pelo *software* (*shareware*) Telix (<http://www.delta.com/delta/deltacom/tfd/>).

O forno utilizado na macrotermobalança foi um forno tubular elétrico com potência nominal de 576W (120V). A cavidade do forno

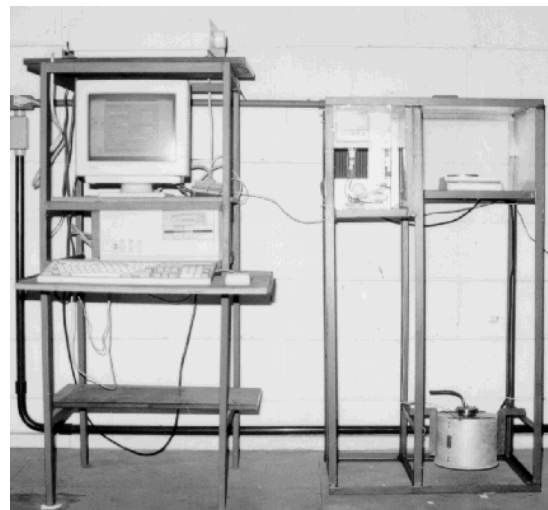


**Figura 5** – Diagrama esquemático da macrotermobalança.

**Figure 5** – Schematic diagram of the Macrothermoscale.

tem diâmetro interno de 50 mm e comprimento de 160 mm. Dentro da cavidade do forno foi colocado o reator de carbonização. O reator foi construído com um tubo de aço inoxidável AISI 304 de 50 mm e comprimento de 150 mm. O diâmetro interno do reator é de 48 mm. No reator foi adaptada uma tampa de aço inoxidável AISI 304, dotada de um tubo, também inoxidável, para retirada dos produtos da combustão e carbonização, e de um furo por onde passa o fio de inoxidável de diâmetro 0,2 mm, que sustenta a amostra ao dispositivo da balança.

Para controlar a temperatura do forno, foi utilizado um controlador de temperaturas PID, marca Therma, modelo TH2131-301, capaz de programar a taxa de aquecimento, em forma de rampa linear, e de fixar a temperatura final em um patamar. As temperaturas foram medidas com termopar tipo K (cromel-alumel) de 1,5 mm diâmetro e de 50 cm comprimento. O controlador envia um sinal de controle (4-20 mA) para um módulo de potência marca ECI, de potência 3,2kW (25A, 127V), ligado em série com a resistência do forno.



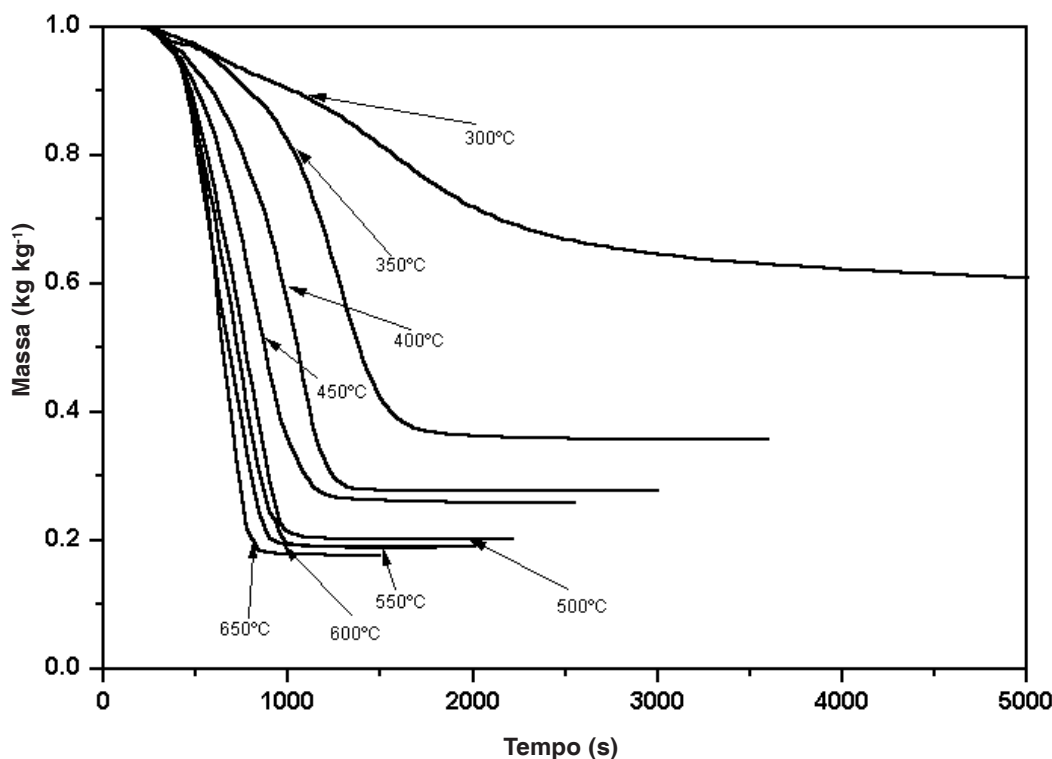
**Figura 6** – Macrotermobalança.

**Figure 6** – Macrothermoscale.

A aquisição de dados foi realizada por uma placa Quatech, modelo DAQ-801 (8 entradas A/D, 2 saídas D/A, 12bits, 40kHz e amplificação 1000x). A escolha dessa placa de aquisição se deveu ao seu baixo custo (US\$300,00 no Brasil). A aquisição de dados foi realizada pelo *software* DaqEZ 1.0 (<http://www.quatech.com/public/dez.htm>).

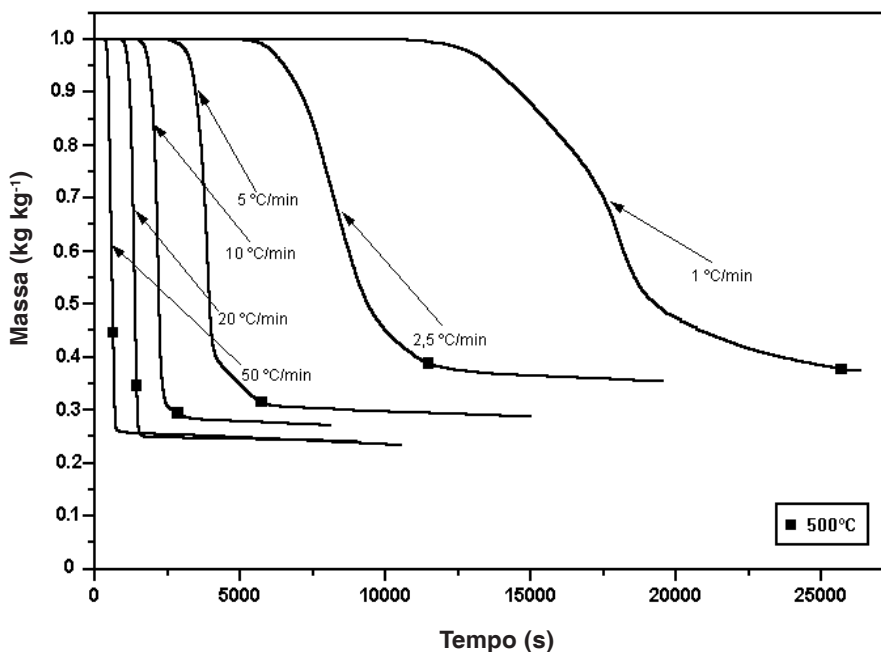
A Figura 7 mostra os ensaios termogravimétricos à temperatura constante (termogravimetria isotérmica), realizados na macrotermobalança. A amostra foi colocada no forno à temperatura ambiente, e submetida à alta taxa de aquecimento ( $75\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ) até a temperatura estabelecida para o ensaio. Pode-se notar que quanto menor a temperatura final de carbonização maior o rendimento em carvão vegetal.

A Figura 8 mostra a influência da taxa de aquecimento na carbonização. Em todos os ensaios, uma vez atingido  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a temperatura foi mantida constante. Acima de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  o ganho de carbono fixo é pequeno, comparado com o consumo de energia necessário para atingir essa temperatura (Oliveira et al., 1984). Pode-se notar que quanto maior a taxa de aquecimento, menor o rendimento em carvão vegetal produzido. Constata-se também que a altas taxas de aquecimento a amostra continua a se decompor, mesmo após o forno ter atingido a temperatura programada ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Esse fato ocorre pela existência de uma diferença de temperaturas entre o forno e o interior da amostra, diferença esta que é função da taxa de aquecimento e dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior da amostra.



**Figura 7** – Influência da temperatura final de carbonização.  
**Figure 7** – Influence of carbonization final temperature.





**Figura 8** – Influência da taxa de aquecimento na carbonização.  
**Figure 8** – Influence of heating rate on carbonization.

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados mostraram a influência da temperatura e da taxa de aquecimento no rendimento da carbonização. Verificou-se que, para todas as espécies analisadas, quanto menor a temperatura e menor a taxa de aquecimento, maior é o rendimento da carbonização. Estes resultados contradizem as análises de Varhegyi et al. (1988), realizados em uma termobalança tradicional, em que a taxa de aquecimento não influenciava o rendimento da carbonização carvão de bagaço de cana. Estes resultados têm sido referenciados na literatura como válidos para a carbonização da biomassa.

A temperatura ótima do processo de carbonização encontra-se na faixa de 300-450 °C, para todas as espécies analisadas, tanto do ponto de vista quantitativo (rendimento gravimétrico), quanto do ponto de vista

qualitativo (teor de carbono fixo). Quanto mais lenta for conduzida a carbonização, maior será o rendimento em carvão.

Apesar dos resultados obtidos nesses experimentos, é muito difícil o controle preciso da velocidade de carbonização nos fornos industriais, tanto devido ao campo de escoamento de gases e de temperatura no seu interior, quanto devido às variabilidades das características (umidade, diâmetro, comprimento e posição) da biomassa utilizada. Entretanto, em um forno de carbonização industrial, a taxa de aquecimento é função da temperatura interna do forno. Assim, de acordo com os resultados obtidos, constata-se que é possível tentar controlar o forno de carbonização de modo a operar com a menor temperatura e menor taxa de aquecimento.

Em experimentos de campo, realizados em uma bateria de fornos de alvenaria JG

em uma carvoaria da Carbojota, verificou-se que com uma correta operação dos fornos é possível passar do rendimento gravimétrico de 22-23% para 35%, sistematicamente, devendo ser ressaltado que em alguns experimentos foi possível atingir 40%.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL, 2004. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2004. Brasília, 169 p. ISS 010-1-6636
- ANTAL, Michael Jerry JR; MOK, William S.L.; VARHEGYI, Gabor; SZEKELY, Tamas. Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal from Biomass. **Energy & Fuels**, v. 4, n. 3, p. 221-225, 1990.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Experiências em Escala de Laboratório para Determinar a Influência da Idade, Umidade e Temperatura de Carbonização sobre Propriedades do Carvão. **Relatório de Projeto**. Belo Horizonte: 1980.
- CHAUVETTE, G. et al. TD/DTG: Method for the characterization of solid residues derived from liquification of lignocellulosics. **Thermochimica Acta**, v. 84, p. 1-5, 1985.
- GOLDSTEIN, I. S. **Wood technology**: chemical aspects. Washington: Am. Chemical Society, 1977. 372 p.
- OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Carbonização da madeira – modelo físico e influência das variáveis de processo. **Metalurgia (ABM)**, v. 40, n. 319, p. 315-19, 1984.
- PINHEIRO, P. C. C.; RESENDE, D. J.; YOSHIDA, M. I. Análise da combustão e carbonização do eucalipto por termogravimetria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COBEM 95), 13.; CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA (CIDIM-95), 2., 1995, Belo Horizonte. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995. CD-ROM.
- SEYE, O. **Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus**. 1998. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.
- VARHEGYI, G. et al. Simultaneous thermogravimetric-mass spectrometric studies of the thermal decomposition of biopolymers. 2. Sugarcane Bagasse in the Presence and Absence of Catalysts. **Energy & Fuels**, v. 2, n. 3, p. 273-277, 1988.