

## ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTOCAGEM DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR ANÁLISE TÉRMICA

Moacyr L. dos Santos, Omar J. de Lima, Eduardo J. Nassar\*, Katia J. Ciuffi e Paulo S. Calefi

Universidade de Franca, Av. Dr. Armando Salles Oliveira, 201, 14404-600 Franca – SP, Brasil

Recebido em 9/1/10; aceito em 18/9/10; publicado na web em 26/1/11

STUDY OF THE STORAGE CONDITIONS OF THE SUGARCANE BAGASSE THROUGH THERMAL ANALYSIS. An evaluation was made of the properties of sugarcane bagasse during the storage process for subsequent burning in a boiler. Samples of bagasse were collected over a period of 150 days from the Caeté sugar mill (MG) at various points of the stockpile soon after the sugarcane was pressed to extract its juice, as well as from natural bagasse, dry and damp. Thermal analyses of the samples were carried out and the results indicated that, during the storage of bagasse, dry or damp, the biomass loses up to 32% of its calorific power, due to decomposition of the hemicellulose.

Keywords: sugarcane bagasse; storage process; calorific power.

### INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar possui em sua constituição aproximadamente 30% de caldo. O restante é biomassa (palha e bagaço) e compostos inorgânicos, como a sílica. Enquanto que a parcela referente ao caldo já é amplamente explorada e de forma competitiva tanto em produtividade como em qualidade e custos de produção, a fração referente à biomassa só recentemente passou a ser mais bem explorada.<sup>1,2</sup>

Na safra 2006/2007 o Brasil moeu 458 milhões de toneladas de cana-de-açúcar; o que corresponde a 550 milhões de barris de petróleo.<sup>3</sup> Contabilizado o potencial energético do álcool, do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, tem-se o equivalente à produção de 1,75 milhões de barris de petróleo/dia.

O bagaço recém-moído possui cerca de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, de 2 a 3% de sólidos insolúveis e de 2 a 3% de sólidos solúveis.<sup>4</sup> É um material complexo, constituído principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, que são os responsáveis pelo seu elevado conteúdo energético. A Tabela 1 apresenta a composição em fibras do bagaço seco e o respectivo teor energético.

**Tabela 1.** Composição das fibras lignocelulósicas do bagaço de cana e seus respectivos teores energéticos

Componente	% em massa no bagaço integral seco	Poder calorífico (MJ/kg)
Celulose	41	17,0
Hemicelulose	25	17,5
Lignina	20	20,1
Bagaço	-	18,5

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2006,<sup>5</sup> o Brasil produziu 106 bilhões de toneladas de bagaço de cana, sendo que somente 7 bilhões de toneladas foram transformados em energia elétrica. Lanças<sup>6</sup> apresenta como vantagens do aproveitamento do bagaço para geração de energia: ser um recurso abundante, renovável e disponível em diversas formas, com produção descentralizada

utilizando recursos regionais e, redução da poluição ambiental com relação ao uso de combustíveis fósseis.

Nas usinas e destilarias, a produção do bagaço inicia-se na fase de recepção da matéria-prima e após a extração do caldo, o bagaço sai das moendas com uma umidade de aproximadamente 50%, sendo enviado em seguida às caldeiras para sua combustão. O excesso de bagaço é enviado a um pátio de estocagem. Entretanto, como se trata de uma indústria de caráter sazonal, o fornecimento de bagaço excedente para fins industriais (produção de vapor e geração de energia elétrica) não pode ser realizado de forma direta e contínua, havendo a necessidade da formação de estoques reguladores, a fim de suprir a sua carência no período da entressafra. A estocagem do bagaço nos pátios das usinas é um dos fatores que contribuem para a ineficiência de sua exploração. A organização física das pilhas é complicada pelas suas dimensões. Na maioria das usinas brasileiras, um trator espalha o bagaço no alto da pilha, que pode chegar a ter cerca de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura (aproximadamente 100.000 toneladas de bagaço estocadas). Nestas, a deterioração da camada externa protege as camadas internas, gerando perdas de até 15 %.<sup>7</sup>

Após a extração do caldo resta ainda no bagaço úmido cerca de 2 a 3% de açúcar que, devido ao alto teor de umidade e à ação microbiana, sofre fermentação, um processo exotérmico, provocando sua deterioração e afetando diretamente suas características, o que, muitas vezes, provoca combustões espontâneas e indesejadas. Essa deterioração é causada, principalmente, por fungos pertencentes à classe dos Basidiomicetos. Esses fungos dividem-se naqueles que causam a podridão parda, destruindo os polissacarídeos da parede celular (hemicelulose e celulose) e os que causam a podridão branca que, além de polissacarídeos, destroem também a lignina.<sup>4</sup>

Apesar de sua importância econômica como matriz energética, a estocagem do bagaço de cana não possui nenhuma técnica ou planejamento, o que acaba gerando o envelhecimento do estoque nas pilhas, já que é depositado aleatoriamente, sem nenhum controle do tempo de armazenagem. Além disso, durante esta estocagem a fermentação faz com o interior da pilha atinja temperaturas elevadas, em torno de 60 °C, contribuindo para a decomposição.

Para um melhor aproveitamento de uma biomassa é fundamental o conhecimento do comportamento térmico e dos parâmetros cinéticos desta, durante o processo de termoconversão. Ramiah<sup>8</sup> estudou a de-

\*e-mail: ejnassar@unifran.br

gradação térmica de amostras comerciais da celulose, de hemicelulose e de lignina usando as técnicas de termogravimetria (TG) entre 25 e 600 °C. Os resultados indicaram que a energia para a degradação térmica da celulose, da hemicelulose e das amostras de lignina está na escala 36-60, 15-26, e 13-19 kcal/mol, respectivamente.

Em outro estudo, Raad *et al.*<sup>9</sup> detectaram a estabilidade térmica e faixa de temperatura de decomposição da hemicelulose, celulose e lignina em espécies de eucaliptos, no coco de babaçu e na piaçava, visando a otimização do processo de fabricação de carvão vegetal para fins siderúrgicos. Segundo estes pesquisadores, os componentes da madeira se decompõem em diferentes faixas de temperatura: a hemicelulose entre 200 e 300 °C, a celulose entre 240 e 350 °C e a lignina entre 350 e 500 °C.

Corradini *et al.*,<sup>10</sup> em estudo da estabilidade térmica de fibras de algodão, mencionam que a hemicelulose se degrada entre 240 e 310 °C, a celulose no intervalo de temperatura de 310 a 360 °C, enquanto que a lignina entre 200 e 550 °C. Afirmam, também, que em muitos processos não é possível os diferentes processos de degradação dos componentes da fibra ligninocelulósica, devido às reações serem complexas e se sobreporem na faixa de 220 a 360 °C.

Kim *et al.*<sup>11</sup> pesquisaram a adição de componentes lignocelulósicos a polímeros e atribuíram que a decomposição da celulose ocorre em temperaturas inferiores a 350 °C, através da quebra de ligações glicosídicas entre os carbonos 1 e 4 de seus monômeros. Apontaram que acima de 400 °C ocorre a quebra das ligações C–O da celulose e das ligações de componentes voláteis, tais como o CO e CH<sub>4</sub>. Sobre a lignina, os pesquisadores indicaram a maior estabilidade térmica desta como relacionada com seu elevado grau de condensação, restando como resíduo, principalmente, componentes fenólicos.

Seye *et al.*<sup>12</sup> estudaram a decomposição de quatro tipos de biomassa (bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduos de madeira e capim elefante) e demonstraram sua relação com o tipo de biomassa e com a taxa de aquecimento do processo. Os resultados obtidos evidenciaram três zonas de perda de massa, sendo a primeira, em torno de 100 °C, atribuída à eliminação da água, enquanto que a segunda (200-350 °C) e a terceira (350-500 °C) são devidas aos processos de degradação da matéria orgânica.

Devido ao grande interesse na otimização do uso do bagaço de cana no processo de cogeração de energia e à necessidade de armazenamento desta matéria-prima em função da sazonalidade de sua produção, este trabalho teve como objetivo geral o uso das técnicas termoanalíticas (TG/DTA/DSC) para o estudo da influência do tempo e das condições de estocagem nas propriedades do bagaço de cana, e consequente perda energética, durante o processo de estocagem (período de armazenamento na entressafra).

## PARTE EXPERIMENTAL

O estudo da estocagem do bagaço de cana dividiu-se em três etapas. Na primeira, foram coletadas amostras de bagaço recém-moído, logo após a passagem pela moenda de extração do caldo. Foram feitas amostragens aleatórias e estratificadas na gigantesca pilha de estoque. Como a parte inferior da pilha de estoque corresponde ao bagaço mais antigo (safra 2005-2006) e a região mais próxima à caldeira é destinada ao bagaço da safra 2006-2007, foram definidos três extratos, um próximo à caldeira, um na base da pilha e outro na faixa intermediária.<sup>13</sup> Em cada extrato foram coletadas 20 amostras a uma profundidade de 50 cm da superfície, eliminando-se possíveis contaminações que porventura poderiam existir no material da superfície. A quantidade de cada amostra foi de aproximadamente 100 g. As amostras de cada extrato, após serem cominuídas em um moinho de facas, foram misturadas e homogeneizadas.

Na segunda etapa, coletou-se uma amostra de 15 kg de bagaço,

que foi dividida em três alíquotas. A primeira foi denominada de bagaço natural; a segunda, que foi seca ao sol por 3 dias, denominada de bagaço seco, e a terceira, que foi aspergida com água todos os dias (até ficar totalmente embebida) para se evidenciar o efeito da água sobre a estocagem do bagaço, denominada de bagaço úmido. Estas três frações foram acompanhadas por 150 dias. Neste período as amostras ficaram expostas às condições ambientais, assim como fica o bagaço na pilha estoque e foram analisadas após 15, 45, 75 e 150 dias do armazenamento, sendo antes secas em estufa a 60 °C e cominuídas em um moinho de facas. O intervalo de tempo utilizado neste estudo corresponde ao tempo máximo de entressafra utilizado pelas indústrias, de forma a se identificar as possíveis transformações que poderiam acontecer neste período.

Na terceira etapa, foi analisada uma amostra de carvão de bagaço de cana produzida em forno de micro-ondas industrial, de forma a identificar as alterações que possam existir nesta alternativa de estocagem do bagaço. Na produção do carvão a temperatura atingiu 400 °C.

Para identificar os componentes do bagaço, foram feitas análises térmicas de dois de seus componentes: a lignina (fornecida pela Dedin) e a Celulose D microcristalina (Vetec). Não foram feitas análises da hemicelulose, pois esta se constitui de um polímero (poliose) e sua estrutura pode variar conforme a condensação de seus monômeros.

A termogravimetria (TG), a termogravimetria derivada (DTG), análise térmica diferencial (DTA) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC) das amostras foram obtidas em um equipamento SDT Q600 com análises simultâneas (TG/DTA/DSC), em cadinho de alumina de 90 µL e taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de ar, com aquecimento de 25 a 600 °C. A massa das alíquotas analisadas variou entre 7 e 12 mg. Não foram utilizadas outras taxas de aquecimento, pois Perez *et al.*<sup>14</sup> em estudo da pirólise do bagaço de cana em atmosfera de ar, observaram que as curvas TG e DTG apresentam aspectos semelhantes independente da taxa de aquecimento (10, 20 40 e 60 °C/min).

O poder calorífico do bagaço foi determinado através da área dos gráficos de DSC. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Celulose

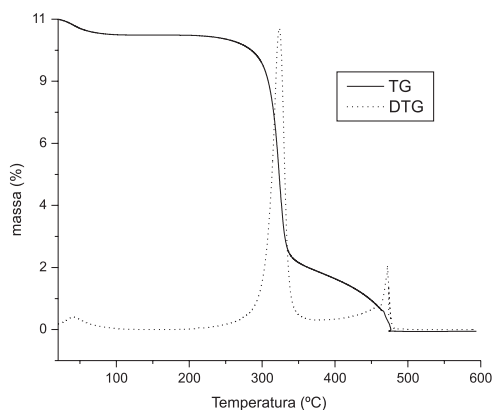
Na Figura 1 são mostradas as curvas TG e DTG para da Celulose D microcristalina. Pode-se observar a presença de três estágios de perda de massa. O primeiro, que ocorre a temperaturas inferiores a 100 °C, é relacionado à perda de umidade. O segundo estágio, entre 200 e 350 °C, com temperatura de máxima em 324 °C, pode ser relacionado à decomposição da matéria orgânica com geração de material carbonizado, que finalmente é queimado na faixa de 350 a 480 °C com temperatura máxima em 470 °C. Os dois primeiros estágios representam uma perda de massa de 80% em relação à amostra inicial.<sup>15</sup>

### Lignina

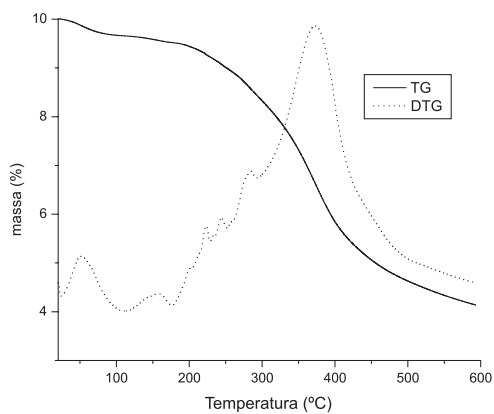
As curvas TG e DTG para a lignina (Figura 2) mostraram dois estágios de perda de massa. O primeiro, entre 25 e 110 °C, com temperatura máxima de massa em 48 °C, está relacionado com a perda de umidade. O segundo estágio, entre 110 e 590 °C, com temperatura máxima em 371 °C, refere-se à degradação da lignina.<sup>15</sup>

### Bagaço estocado e recém-moído

A Figura 3 mostra as curvas TG e DTG para os bagaços recém-moído (novo) e da safra anterior coletado em pontos diferentes, os



**Figura 1.** Curvas TG e DTG da Celulose D microcristalina comercial, obtidas em atmosfera de ar com razão de aquecimento de 10 °C/min

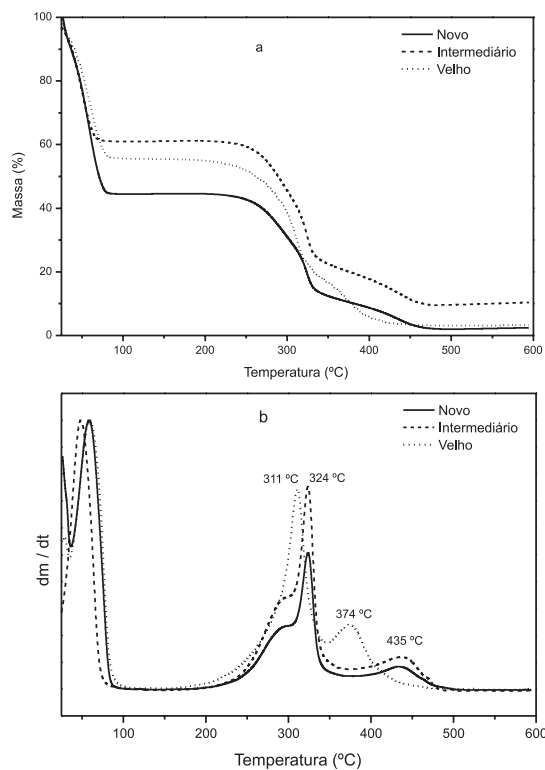


**Figura 2.** Curvas TG e DTG para a lignina, obtidas em atmosfera de ar com razão de aquecimento de 10 °C/min

quais foram denominados de bagaço não muito antigo (intermediário) e mais antigo (velho). As curvas TG apresentaram-se semelhantes para o bagaço recém-moído e o coletado em diversos pontos, diferindo entre si na porcentagem de perda de massa. As três curvas apresentaram três estágios de perda de massa, a curva relativa ao bagaço da safra anterior apresenta uma pequena diferença após o segundo estágio de perda de massa, que fica melhor visualizado na curva DTG. O primeiro estágio de perda de massa é atribuído à umidade do bagaço; nos outros estágios de perda de massa relativos à matéria orgânica, compatíveis com o estudo de Orfão e Figueiredo,<sup>16</sup> que evidenciaram que em temperaturas abaixo de 230 °C predomina a decomposição da hemicelulose; entre 230 e 260 °C, a hemicelulose e a celulose sofrem decomposição térmica. Entre 260 e 290 °C, considera-se o final da decomposição da hemicelulose, predominando a seguir a decomposição da celulose.

Em estudo de Heikkinen *et al.*,<sup>17</sup> a análise térmica para amostras de pinus comprovou, através das curvas TG e DTG, que a lignina e a hemicelulose começam a decompor em temperaturas mais baixas do que a celulose, sendo que a decomposição da lignina apresenta uma escala de temperatura longa, semelhante à obtida para a amostra de lignina aqui considerada. O estudo cita, ainda, que o pico principal da degradação de toda a espécie de madeira, apresentado na curva DTG, corresponde a perdas de componentes voláteis da celulose. O ombro da curva à esquerda deste pico corresponde à decomposição da hemicelulose. Além disso, em torno de 400 °C, observa-se uma decomposição lenta da lignina, também observada na amostra de lignina.

De acordo com estes estudos e comparando-se com os resultados obtidos para as amostras de lignina e celulose, foram relacionados os estágios de perda de massa nas curvas TG com os componentes



**Figura 3.** Curvas TG (a) e DTG (b) para a amostra de bagaço recém-moído (novo), intermediário e velho das safras anteriores, obtidas em atmosfera de ar com razão de aquecimento de 10 °C/min

nas amostras de bagaço analisadas. Nestas amostras, o primeiro estágio de perda de massa apresenta temperaturas inferiores a 100 °C, relativas à evaporação gradual da água contida no bagaço; como já era esperado, o bagaço de cana recém-moído apresenta uma umidade maior que os demais. Há um segundo estágio, entre 275 e 305 °C, atribuído à decomposição da hemicelulose, o terceiro, entre 300 e 325 °C, atribuído à decomposição da celulose e um quarto estágio acima de 400 °C atribuído à decomposição da lignina. Através da DSC, foi possível detectar que o primeiro estágio constitui um fenômeno endotérmico e os demais, fenômenos exotérmicos.

As curvas DTG para a amostra de bagaço recém-moído (Figura 3) evidenciam a ocorrência de quatro estágios de perda de massa, relativos à umidade, hemicelulose, celulose e lignina. O primeiro estágio, endotérmico, representa uma perda de massa de 55,5%, atribuída à umidade da amostra, com temperatura máxima de 59 °C. Esta umidade presente no bagaço é comum, pois no processo de prensagem da cana-de-açúcar para extração da sacarose é adicionada água para embebição e lixiviação das fibras. As caldeiras utilizadas para queima do bagaço como combustível são dimensionadas para trabalhar com umidade entre 50 e 55%. O segundo e o terceiro estágios, exotérmicos com temperaturas máximas em 298 e 323 °C, com perda de 30% da massa, relacionam-se com a decomposição da hemicelulose e celulose, respectivamente; e o quarto, também exotérmico, com temperatura máxima de 433 °C e perda de 13,5% em massa, é relacionado com a degradação da lignina. O resíduo a 600 °C é de 2%.

As curvas TG e DTG (Figura 3) para o bagaço da safra anterior evidenciam a ocorrência de três estágios de perda de massa, relativos à umidade, celulose e lignina. O primeiro estágio, endotérmico, representa uma perda de massa de 44,5%, atribuída à umidade da amostra, com temperatura máxima de 59 °C; o segundo, exotérmico com temperatura máxima de 311 °C, de 33,5%, relaciona-se com a decomposição da celulose; e o terceiro, também exotérmico com

temperatura máxima de 374 °C e perda de 19%, é atribuído à decomposição da lignina. O resíduo a 600 °C é de 3%.

A ocorrência de apenas três picos de perda de massa máxima, sendo que a etapa relativa à hemicelulose, em torno de 300 °C, que estava presente na amostra recém-moída, não ocorreu no bagaço da safra anterior, aparecendo apenas à atribuída à celulose, em 311 °C. O terceiro, em 374 °C, é relacionado com a degradação da lignina. Estes resultados evidenciam que durante a estocagem a hemicelulose se decompõe, o que acarreta perda do poder calorífico do bagaço. Também, verifica-se que o bagaço da safra anterior apresenta a lignina se decompondo mais rapidamente a uma temperatura menor que a verificada para o bagaço recém-moído e que a temperatura de perda máxima de massa, 374 °C, está muito próxima da obtida para a lignina pura, 371 °C, o que sugere que durante o processo de estocagem ocorreu o fenômeno da deslignificação das fibras do bagaço.

As curvas TG e DTG para a amostra de bagaço coletada sobre a pilha (Figura 3) apresentam quatro estágios de perda de massa. O primeiro, com temperatura máxima de 48 °C, é endotérmico e representa uma perda de massa de 39%, atribuída à umidade da amostra. O segundo e o terceiro estágios de perda de massa, exotérmicos, ocorrem entre 160 e 374 °C; na temperatura de 304 °C está relacionada com a degradação da hemicelulose e em 324 °C, relacionada com a degradação da celulose. O quarto estágio de perda de massa, também exotérmico, ocorre entre 374 e 490 °C, com temperatura de máxima de 437 °C, relacionado com a degradação da lignina.

O poder calorífico do bagaço foi determinado através da área das curvas de DSC, relativa aos fenômenos exotérmicos. Utilizou-se para cálculo da área, o ponto de início da decomposição da matéria orgânica, relativa à hemicelulose, em torno de 160 °C, até o final da decomposição, relativa à lignina. A Figura 4 apresenta a curva de DSC para a amostra de bagaço recém-moído, indicando os limites utilizados no cálculo da área (região hachurada) e, conseqüentemente, o poder calorífico.

Para a amostra de bagaço recém-moído foi encontrado o valor de  $4.945 \pm 480$  J/g, enquanto que para a amostra de bagaço da safra anterior (intermediário) o valor foi de  $3.796 \pm 530$  J/g. A redução no poder calorífico do bagaço envelhecido em relação ao bagaço recém-moído, de cerca de 23%, está relacionada com a deslignificação da fibra e conseqüente decomposição da hemicelulose durante a estocagem. O bagaço mais antigo (velho) apresentou uma maior perda do poder calorífico  $2.958 \pm 760$  J/g, esses valores foram obtidos pela média de cada uma das três partes da pilha. O desvio padrão aumenta com a idade do bagaço devido à homogeneidade do bagaço, que também diminui com o passar do tempo.

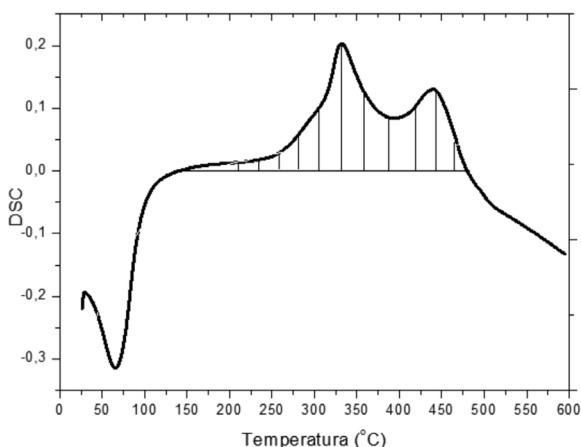


Figura 4. Curva DSC para a amostra de bagaço recém-moído, obtida em atmosfera de ar com razão de aquecimento de 10 °C/min

## Amostras de bagaço monitoradas por 150 dias

Nesta etapa, uma amostra de 15 kg bagaço recém-moído foi dividida em três alíquotas: uma denominada de bagaço natural; a segunda, que foi seca ao sol por 3 dias, denominada de bagaço seco; e a terceira que foi aspergida com água durante 1 min todos os dias, denominada de bagaço úmido.

A amostra de bagaço natural foi exposta às intempéries (sol, vento, etc, exceto chuva), e analisada aos 15, 45, 75 e 150 dias, após secagem em estufa a 60 °C. As curvas TG e DTG (Figura 5) para as amostras de bagaço recém-moído e com 150 dias de estocagem mostram a ocorrência dos quatro estágios de perda de massa relativos à umidade, hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente. As demais amostras apresentaram características semelhantes.

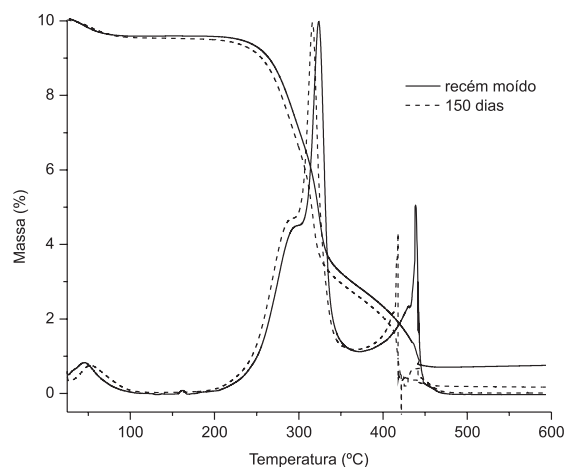


Figura 5. Curvas TG e DTG para as amostras de bagaço natural analisadas recém-moída e após 150 dias, obtidas em atmosfera de ar como razão de aquecimento de 10 °C/min

As curvas DTG para as amostras de bagaço recém-moído e após 150 dias de estocagem apresentam características semelhantes, com pequenas variações, para valores menores, na temperatura de perda máxima de massa.

A amostra de bagaço seco não foi exposta às intempéries (sol, vento, etc, exceto chuva), e também foi analisada aos 15, 45, 75 e 150 dias de armazenamento. As curvas TG e DTG apresentam os quatro estágios de perda de massa, característicos do bagaço. As curvas DTG mostram que com o tempo de estocagem a temperatura de perda máxima de massa é deslocada para valores menores.

A amostra de bagaço úmido ficou exposta às intempéries (sol, vento, etc, exceto chuva), sendo aspergida com água todos os dias durante 1 min, no período da manhã. Foi analisada aos 15, 45, 75 e 150 dias. As curvas TG e DTG, assim como para as amostras de bagaço natural e seco, apresentam quatro estágios de perda de massa e evidenciam que com a estocagem há redução nos valores da temperatura máxima de perda de massa. Entretanto, a alteração mais significativa ocorreu em relação ao poder calorífico inferior, que foi determinado através da área das curvas de DSC, relativa aos fenômenos exotérmicos. Utilizou-se para cálculo da área o ponto de início da decomposição da matéria orgânica, relativa à hemicelulose, em torno de 160 °C, até o final da decomposição, relativa à lignina. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

O fato de maior importância a destacar é que, independentemente da secagem do bagaço e sua exposição às intempéries, sempre ocorre redução de seu poder calorífico. Como a perda do poder calorífico no bagaço úmido é muito mais intensa, pode-se inferir que esta perda está relacionada com a fermentação do bagaço, causada, entre outros



**Tabela 2.** Poder calorífico, em J/g, das amostras de bagaço monitoradas por 150 dias. A variabilidade entre os resultados da duplicata é da ordem de 200 J/g

Análise	Bagaço natural	Bagaço seco	Bagaço úmido
Inicial	12680	12680	12680
15 dias	12006	11024	7428
45 dias	11133	10433	6236
75 dias	8796	10478	6135
150 dias	8988	8588	6062

motivos, pela presença de fungos decompositores.<sup>4,18</sup>

Mobarak *et al.*, citados por Teixeira *et al.*,<sup>4</sup> relacionam a perda de massa de chapas de aglomerado feitas com bagaço de cana-de-açúcar, justificada pelo fato do bagaço ser constituído de aproximadamente 30% em material não fibroso, que formam a medula ou o miolo da cana-de-açúcar. Estas células, por não serem lignificadas e formadas por uma fina camada celulósica, funcionam como depósito de açúcares e amido, sendo mais facilmente degradadas por micro-organismos que as células fibrosas.

### Amostra de carvão do bagaço

Como alternativa à estocagem do bagaço de cana-de-açúcar, pode-se realizar a pirólise deste. O carvão obtido é um produto resultante da combustão incompleta de resíduos lignocelulósicos, obtidos através de uma policondensação energética. Possui densidade inferior à da madeira e alta reatividade, além de apresentar baixo teor de cinzas. É menos higroscópico e mais resistente ao apodrecimento ou à fermentação do que o bagaço na condição natural, facilitando a estocagem e muito mais ainda o transporte. Na forma de briquetes, apresentará maior densidade energética, reduzindo-se os pátios de estocagem e a dimensão de equipamentos atualmente utilizados.<sup>18</sup>

A Figura 6 apresenta as curvas TG e DTG para amostra de carvão obtida em forno de micro-ondas industrial a 400 °C. São observados dois estágios de perda de massa, sendo que o primeiro estágio apresentou uma perda de massa de 6,3%, atribuída à umidade da amostra, com temperatura máxima de 51 °C. O segundo estágio ocorreu entre 230 e 518 °C, correspondendo a 89,1% de perda de massa, com picos nas temperaturas de 419, 431 e 450 °C, restando ao final um resíduo de 4,6% em massa.

A curva DTG permite identificar três picos de temperatura de perda máxima de massa relativos à matéria orgânica (419, 431 e 450 °C) distintos dos observados para as amostras de bagaço, sugerindo que a estrutura do bagaço sofreu alterações durante o processo de carbonização. O poder calorífico do carvão calculado através da curva DSC foi de 14.076 J/g.

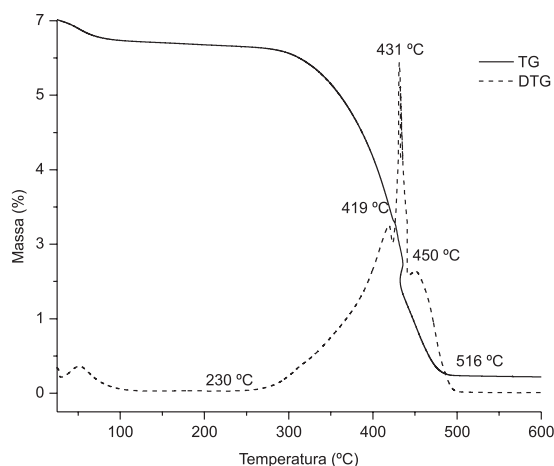
### CONCLUSÃO

Os resultados das análises termogravimétricas mostram que há uma perda de cerca de 30% no poder calorífico do bagaço de cana, em períodos de estocagem de até 150 dias, correspondente à entressafra, provavelmente provocados por fungos decompositores.

As análises comprovaram que, seja seco ou conservado na umidade natural, o bagaço sempre sofre degradação e que esta é acentuada na presença de grande quantidade de umidade.

Na ausência de um projeto de estocagem do bagaço para a finalidade da cogeração de energia, o ideal é seu consumo logo após a produção, pois períodos longos de estocagem levam à sua decomposição, independente da presença ou não de umidade.

Devido ao alto volume produzido e às dificuldades para preparação, manutenção, enfardamento e transporte do bagaço, além deste



**Figura 6.** Curvas TG e DTG para a amostra de carvão, obtida em atmosfera de ar com razão de aquecimento de 10 °C/min

ocupar áreas muito grandes para estocagem, pode-se concluir que a transformação do bagaço em carvão é uma alternativa viável para a estocagem do mesmo, seja pulverizado ou na forma de briquetes.

### AGRADECIMENTOS

Às agências brasileiras de fomentos FAPESP, CNPq e CAPES.

### REFERÊNCIAS

1. União das Indústrias Canavieiras; *Açúcar e álcool do Brasil: Commodities da Energia e do Meio Ambiente*, 1ª ed., São Paulo, 2004.
2. Moriya, R. Y.; Duarte, M. M. C.; Medeiros, M. B.; Gonçalves, A. R.; *Resumos do X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica*, São José dos Campos, Brasil, 2006.
3. <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa02200705.shtm>, acessada em Março 2007 e Janeiro 2011.
4. Teixeira, D. E.; Costa, A. F.; Santana, M. A. E.; *Scientia Forestalis* **1997**, 52, 29.
5. <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.asp>, acessada em Janeiro 2011.
6. Lanças, K. P.; *A evolução das alternativas energéticas com a crise do petróleo e a projeção da biomassa*, Ed. da UNESP: Botucatu, 1984.
7. Almeida, C. A.; Clua, E. W. G.; *Resumos do Prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
8. Ramiah, M. V.; *J. Appl. Polym. Sci.* **1970**, 14, 1323.
9. Raad, T. J.; Pinheiro, P. C. C.; Yoshida, M. I.; *Cerne* **2006**, 12, 93.
10. Corradini, E.; Teixeira, E. M.; Paladini, P. D.; Agnelli, J. A.; Silva, O. R. R. F.; Mattoso, L. H. C.; *J. Therm. Anal. Cal.* **2009**, 97, 415.
11. Kim, H. S.; Yang, H. S.; Kim, H. J.; Lee, B. J.; Hwang, T. S.; *J. Therm. Anal. Calorim.* **2005**, 81, 299.
12. Seye, O.; Cortez, L. A. B.; Gomez, E. O.; Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos, em *Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas, Brasil, 2003, [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC00000022000000200022&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000022000000200022&lng=en&nrm=iso), acessada em Maio 2009.
13. Harris, D. C.; *Análise Química Quantitativa*, 6ª ed., LCT: Rio de Janeiro, 2005.
14. Perez, M. G.; Chaala, A.; Yang, J.; Roy, C.; *Fuel* **2001**, 80, 1245.
15. Beall, F. C.; Eickner, H. W.; *U.S.D.A. Forest Service Research Paper* **1970**, 130.
16. Órfão, J. J. M.; Figueiredo, J. L.; *Thermochim. Acta* **2001**, 380, 67.
17. Heikkinen, J. M.; *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2004**, 71, 883.
18. Quirino, W. F.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1991.