

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES SANITÁRIO E INDUSTRIAL COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF SEWAGE AND INDUSTRIAL SLUDGES AS BIOMASS IN THE ENERGY GENERATION PROCESS

Fabricio Borges¹, Noeli Sellin², Sandra Helena Westrupp Medeiros³

Programa de Mestrado em Engenharia de Processos
Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE
Campus Universitário s/n, Caixa postal, 246, Bairro Bom Retiro, CEP: 89201-972, Joinville, SC Brasil
Telefone: (47) 3461-9180 – FAX: (47) 3473-0131
E-mail: ¹borges.fabricio@ibest.com.br; ²nsellin@yahoo.com.br; ³sandra.helena@univille.net

RESUMO

Para usar como combustível na geração de energia, amostras de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes (sanitário e de indústrias de celulose e papel e têxtil) foram caracterizadas por análises química elementar (CNHS) e aproximada (teor de sólidos totais, sólidos voláteis, cinzas e umidade) e poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) e seu comportamento térmico foi estudado por análises termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD) simultâneas, frente à combustão (meio oxidante) e pirólise (meio inerte). As amostras de lodos sanitário e têxtil demonstraram semelhança na composição elementar e análise aproximada, enquanto que a de lodo da indústria de celulose e papel apresentou carga orgânica e sólidos voláteis maiores que as demais. O poder calorífico das amostras foi da ordem de 19 MJ/kg. De ATD, pode ser observado que tanto em combustão como em pirólise, entre 200 e 600 °C, as amostras tiveram comportamento térmico semelhante, com significativa liberação de energia. Conforme resultados de ATG, nas condições de combustão, a amostra de lodo de celulose e papel apresentou maior estabilidade térmica do que as demais e todas as amostras apresentaram menor porcentagem de resíduos ao final desse processo do que em pirólise.

Palavras-chave: biomassa; lodos sanitário e industrial; geração de energia.

ABSTRACT

In order to use as fuel in the energy generation, samples of sludge from treatment plants of effluents (sewage and of pulp and paper and textile industries) were characterized by elemental analysis (CNHS) and approximate analysis (total solids, humidity, volatile solids and ash content) and calorific value and their thermal behavior by thermogravimetric (TGA) and differential thermal (DTA) analysis simultaneously under combustion (oxidative atmosphere) and under pyrolysis (inert atmosphere). The samples of sewage and textile sludge demonstrated similarity in the elemental composition and approximate analysis, whereas the pulp and paper sludge showed an organic content and volatile solids greater than the other. The calorific value of the samples showed average value of 19 MJ/kg. From DTA it can be observed that in both combustion and pyrolysis, between 200 and 600 °C, the samples had similar thermal behavior with significant release of energy. According to TGA results under the conditions of combustion, the sample of sludge from pulp and paper industry presented greater thermal stability than the other and all samples showed lower percentage of residue in the end of this process than in pyrolysis.

Keywords: biomass, sewage and industrial sludges; energy generation.

1 – INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos (lodo) provenientes de sistemas de tratamento de efluentes industriais e sanitários representa um grande problema de âmbito mundial (COSTA, 1995), assim sua utilização como matéria-prima alternativa em determinados processos representa uma solução ambiental e economicamente viável (BOROWSKI *et al*, 2002). A gestão dos resíduos sólidos provenientes de processos industriais e de tratamento de efluentes industriais e sanitários é uma das questões de maior relevância na agenda ambiental da maioria dos países. Particularmente, em determinadas

regiões, vem se agravando em consequência do acelerado processo de industrialização, em função da diversificação do parque industrial e da geração de ampla gama de tipos de resíduos, aliados à elevação do crescimento demográfico (DE SENA, 2005).

A produção de energia elétrica e térmica, a partir de biomassas, atualmente é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento (ANEEL, 2006). Sistemas de co-geração, que permitem produzir, simultaneamente, energia elétrica e calor útil, configuram uma das tecnologias mais racionais para a utilização de combustíveis.

As biomassas mais comuns para uso em co-geração de energia são os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar, que são cultivadas e colhidas com o objetivo de produzir combustível e gerar energia (BOTÃO e LACAIVA, 2004). O uso de lodos de estações de tratamento de efluentes como combustível alternativo na co-geração de energia vem sendo estudado por diversos autores, porém seu emprego ainda não é bem difundido (DE SENA *et al*, 2007; SÄNGER *et al*, 2001).

Em condições favoráveis, a biomassa pode contribuir de maneira significativa na produção de energia elétrica e térmica. A aplicação de resíduos sólidos como biomassa e alternativa como combustível está intimamente ligada às suas características físicas e químicas e ao seu comportamento frente a condições de combustão e pirólise (ZHENG, 2000).

O conhecimento dos possíveis eventos térmicos que ocorrem nestas condições é importante devido, principalmente, ao controle do processo visando obter produtos aceitáveis e reutilizáveis na geração de energia. Técnicas termo analíticas, particularmente análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG), fornecem estas informações de maneira rápida e simples.

Visando avaliar a potencialidade da biomassa na geração de energia, neste trabalho, efetuou-se a caracterização física e química por análise elementar e aproximada, a determinação de poder calorífico e o estudo do comportamento térmico frente à combustão e pirólise de amostras de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes sanitário, de indústria de celulose e papel e de indústria têxtil.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de lodos provenientes de três diferentes sistemas de tratamento de efluentes foram usadas neste estudo, sendo:

– Lodo sanitário: fornecido pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de São Bento do Sul - SC (SAMAE-SBS). A estação de tratamento de efluentes domésticos é composta por gradeamento, desarenador, reator anaeróbico de leito fluidizado (RALF), lagoa de aeração (lodo ativado), lagoas de decantação, adensador de lodo e leitos de secagem.

– Lodo têxtil: fornecido pela empresa Döhler S.A. de Joinville – SC, proveniente do sistema de tratamento de efluentes composto por peneira estática, tratamento físico-químico (clarificação), lagoas de aeração (lodo ativado), decantador de lodo e filtro-prensa.

– Lodo de celulose e papel: fornecido pela empresa Rigesa S.A., localizada no município de Três Barras – SC, proveniente de tratamento físico-químico, decantador (clarificador), uma lagoa de aeração e duas de decantação e filtro-prensa.

Previamente aos ensaios, descritos a seguir, com exceção da análise de umidade e sólidos totais, as amostras de lodo foram secas em estufa a 105 °C, por 24 horas.

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) elementar das amostras foram obtidos em equipamento CHN Perkin-Elmer. Este método é baseado na oxidação

completa da amostra (combustão) e análise dos gases liberados. A porcentagem de enxofre elementar (S) foi obtida por espectroscopia de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES) num equipamento Spectro Ciros CCD.

A análise aproximada dos teores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis totais e cinzas foi obtida segundo metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (GREENBERG *et al*, 1998).

O poder calorífico foi determinado a partir da energia (calor de combustão) liberada durante a combustão das amostras em calorímetro Parr, modelo 1241, em atmosfera de oxigênio sob alta pressão.

O comportamento térmico das amostras foi estudado a partir dos resultados das análises termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD) simultâneas realizadas num termoanalisador da marca NETZSCH, modelo STA - 409 EP. As amostras foram submetidas ao analisador térmico sob duas atmosferas: em meio oxidante usando ar sintético, com 79 por cento de N₂ e 21 por cento de O₂, para avaliar a combustão, e em meio inerte usando argônio para avaliar a pirólise. As demais condições foram mantidas iguais para os dois processos: taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, faixa de aquecimento da temperatura ambiente à 1100 °C e fluxo de gás de 70 cm³/minuto.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise elementar

Os valores dos teores (%) de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre elementar encontrados no lodo sanitário podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise elementar do lodo sanitário.

Elemento	Média (%)	Desvio (± %)
C	27,5	0,29
H	4,32	0,06
N	4,40	0,05
S	0,86	0,05

Num primeiro momento, esperava-se que o lodo sanitário apresentasse alta concentração de carbono em sua composição, principalmente devido à matéria orgânica, geralmente presente neste material oriundo de esgoto doméstico. O baixo valor de teor de carbono, de 27,5 por cento, pode estar relacionado ao fato de que existem diferentes pontos de coleta de efluentes espalhados pela área de cobertura da rede coletora de esgoto que abrange regiões industriais da cidade de São Bento do Sul (BÜTTELBRUN, 2004). Nestes pontos, estão estabelecidas empresas metal-mecânicas e moveleiras, e seus efluentes, ricos em materiais inorgânicos, geralmente são destinados à rede coletora de esgoto muitas vezes sem tratamento adequado, contribuindo assim, com a redução do teor de matéria orgânica na constituição final do lodo da estação de tratamento de efluente sanitário.

O valor encontrado para o teor de nitrogênio no lodo sanitário, de 4,40 por cento, se assemelhou muito com o encontrado por Büttelbrun (2004), que foi de 4,57 por

cento, como também por Malta (2001), que ressalta que a concentração de nitrogênio está na faixa de 0,5 a 7,6 por cento em relação à massa total para lodos sanitários gerados a partir de digestão aeróbica. Apesar de ser baixo, o teor de nitrogênio merece atenção uma vez que pode interferir competindo com o carbono durante a queima do combustível e formar compostos nitrogenados oxidados. O teor de enxofre encontrado, de 0,86 por cento, foi ligeiramente superior ao obtido por Büttelbrun (2004), porém, é considerado baixo, resultando em baixas emissões de SO₂ após sua combustão.

Conforme resultados da Tabela 2, o lodo têxtil também apresentou baixo teor de carbono, de 27,2 por cento, tal como o sanitário, porém com menores teores de nitrogênio, de 2,86 por cento, e de enxofre, de 0,33 por cento, provavelmente devido a sua origem e tratamento por sistema de lodos ativados. O teor de hidrogênio manteve-se bem próximo ao obtido para o lodo sanitário.

Tabela 2. Análise elementar do lodo têxtil.

Elemento	Média (%)	Desvio (± %)
C	27,2	0
H	4,00	0,12
N	2,86	0,03
S	0,33	0,02

Em pesquisa descrita por Knuth (2001), os efluentes originados pela indústria têxtil costumam apresentar “níveis relativamente baixos” de metais pesados. Porém, podem possuir, muitas vezes, altas concentrações de outros metais e materiais inorgânicos, tais como cálcio, ferro, sódio, magnésio, alumínio e potássio, provenientes das substâncias usadas na etapa físico-química no processo de tratamento do efluente bem como presentes na água usada no processo industrial, resultando em lodo com menor quantidade de matéria orgânica e, conseqüentemente, menor teor de carbono presente.

O lodo da empresa de celulose e papel apresentou maiores teores de carbono, hidrogênio e enxofre e menor concentração de nitrogênio, quando comparado aos demais lodos, conforme mostrado na Tabela 3. O elevado teor de carbono obtido, de 44,8 por cento, deve-se, principalmente, à presença de materiais fibrosos orgânicos, que de acordo com Campregher (2005), correspondem a teores na faixa de 40 a 60 por cento da sua composição ao final do processo de tratamento. Entretanto, segundo Gottsching e Pakarinen (2000), sua constituição pode possuir em média 37 por cento de carga inorgânica e 19 por cento de carbonato de cálcio, devido ao processo de fabricação do papel. O teor mais elevado de hidrogênio encontrado pode estar relacionado à maior porcentagem de carbono determinada neste lodo, uma vez que os dois são constituintes das cadeias carbônicas das fibras de celulose. Yu *et al* (2002) encontraram o valor de 4,53 por cento para o teor de hidrogênio em lodo proveniente de um sistema de tratamento de efluente semelhante ao empregado na geração do lodo analisado neste trabalho. A presença de hidrogênio no combustível contribui na energia liberada durante o processo de queima.

Tabela 3. Análise elementar do lodo de celulose e papel.

Elemento	Média (%)	Desvio (± %)
C	44,8	0,02
H	5,38	0,03
N	1,77	0,17
S	1,76	0,18

A concentração de nitrogênio obtida, de 2,86 por cento, foi menor do que as encontradas para os demais lodos analisados. Isto se deve principalmente ao processo industrial não empregar substâncias nitrogenadas, como também, ao tipo de tratamento de efluente utilizado, onde o lodo é recirculado nas lagoas aeróbicas, ocasionando a oxidação da maior parte do nitrogênio, que neste caso provém do efluente sanitário gerado na empresa. O valor de nitrogênio encontrado foi maior que os obtidos por Yu *et al* (2002) e Caputo (2001) para lodos de produção de papel, que foram de 0,70 e de 0,32 por cento, respectivamente. A diferença entre os resultados apresentados pode estar relacionada ao fato da estação de tratamento receber efluente gerado desde a lavagem de toras, como também as cinzas geradas na caldeira de força, além do processo normal da fabricação da massa celulósica, que pode sofrer diversas variações.

3.2 Análise aproximada

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise aproximada de sólidos totais, cinzas, sólidos voláteis e umidade para os três lodos analisados.

Tabela 4. Análise aproximada – teores de sólidos totais, cinzas e sólidos voláteis.

Lodo	Sólidos Totais (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)	Sólidos Voláteis Totais (%)
Sanitário	90,9	9,05	47,6	43,3
Celulose e papel	89,1	10,9	13,6	75,5
Têxtil	91,0	8,96	44,3	46,8

Observando-se os valores apresentados na Tabela 4, verifica-se que os teores de sólidos totais e de umidade foram praticamente iguais para todas as amostras. O percentual de cinzas geradas do lodo de celulose e papel foi em torno de 30 vezes inferior e o teor de sólidos voláteis totais aproximadamente 40 vezes superior em relação aos outros dois lodos, cujos valores foram bem próximos entre si.

O teor de umidade encontrado nos três lodos pode ser considerado baixo em relação à totalidade da amostra, e a importância de sua determinação se deve ao fato da influência que a água exerce em processos de combustão, pois, se presente em teores elevados, pode conduzir à necessidade de secagem prévia da biomassa e, conseqüentemente, mais energia para essa operação. Neste sentido, os sistemas de tratamento de efluentes terão que alcançar maior eficiência na etapa de secagem do lodo formado.

Analisando-se o teor de cinzas, destaca-se o menor valor obtido para o lodo de celulose e papel, indicativo da

presença de quantidades maiores de substâncias inorgânicas na composição dos lodos sanitário e têxtil em relação ao primeiro, o que é reforçado pelos teores de sólidos voláteis totais apresentados (teoricamente a carga orgânica das biomassas). Considerando-se a utilização como combustível, o lodo de celulose e papel apresentou melhores condições, visto que tenderia a uma menor geração de cinzas a serem dispostas e/ou reutilizadas em outros processos posteriormente.

3.3 Poder calorífico

A energia liberada num processo de combustão normalmente é quantificada pelo poder calorífico de um combustível, definido como a quantidade de calor desprendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível. De acordo com De Sena (2005), para um bom rendimento térmico na combustão, o combustível deve possuir uma elevada quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, além de alto poder calorífico. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a eficiência combustão na liberação de energia. A Tabela 5 apresenta os resultados do poder calorífico das amostras de lodo.

Tabela 5. Poder calorífico das amostras de lodo.

Lodo	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Sanitário	20,1 ± 0,6	18,6 ± 0,6
Celulose e papel	19,5 ± 0,7	18,0 ± 0,7
Têxtil	17,0 ± 0,4	15,4 ± 0,4

Mesmo com a variação na composição, devido a fatores como a forma de coleta de esgotos domésticos, variações sazonais, alterações nos processos fabris e nos sistemas de tratamentos de efluentes, as amostras de lodo sanitário e de celulose e papel apresentaram valores bastante próximos de poder calorífico, da ordem de 19 MJ/kg para o PCS e 18 MJ/kg para o PCI. O lodo têxtil apresentou valores ligeiramente menores, conforme observado na Tabela 5. Os valores de PCS encontrados para os lodos são superiores aos da madeira de descarte (PCS = 13 MJ/kg) e bagaço de cana em briquete (PCS = 14,5 MJ/kg), que já são empregados na geração de energia (ARAUTERM, 2008). Encontram-se ainda, dentro da faixa obtida para resíduos industriais genéricos (16,0 MJ/kg), resíduos hospitalares (14,0 MJ/kg) e refugos variados (18,5 MJ/kg), e acima dos valores previstos para lodo seco de estações de tratamento de efluentes (12,5 – 15,0 MJ/kg), conforme citado por Almeida (2007).

Os resultados de poder calorífico apresentados pelos lodos estudados são um indicativo da sua aplicabilidade como biomassa combustível na geração de energia, o que pode ser comprovado pelos resultados de ATG e DTA apresentados a seguir.

3.4 Análises térmicas

A Figura 1 apresenta as curvas de ATG das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel sob atmosfera inerte (pirólise).

Observa-se dos termogramas da Figura 1 que, em meio inerte (pirólise), para as três amostras de lodo, existe uma tendência geral de decomposição térmica, com perdas de massa de aproximadamente 1 por cento até 160 °C, entre 170 e 560 °C, de 35 a 39 por cento (em dois estágios) e, entre 600 e 1000 °C, aproximadamente, de 6 a 10 por cento (em dois estágios).

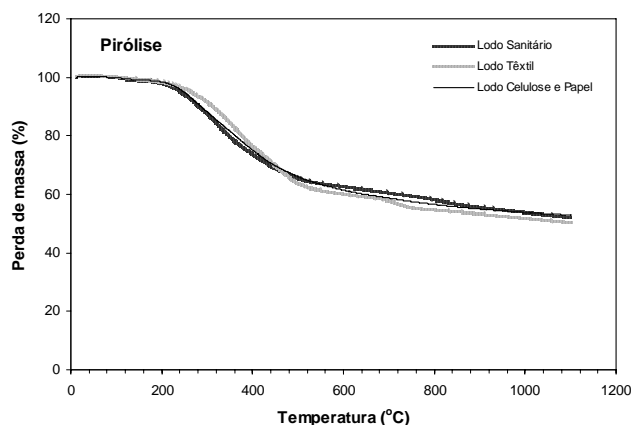


Figura 1. ATG das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel – pirólise.

A Figura 2 apresenta as curvas de ATD das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel sob atmosfera inerte (pirólise).

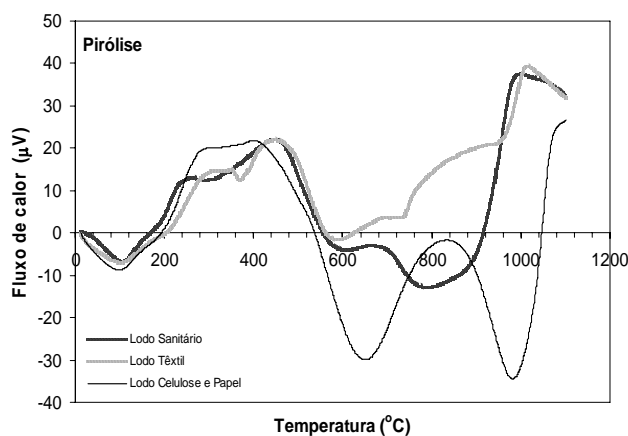


Figura 2. ATD das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel – pirólise.

Dos resultados de ATD apresentados na Figura 2, observa-se que abaixo de 150 °C ocorre um pico endotérmico, para as três amostras, devido a reações de desidratação. Na região de 160 a 600 °C, também se verifica um comportamento semelhante entre as amostras de lodo, com eventos exotérmicos (liberação de calor) ocorrendo em dois estágios. A partir de 600 °C, a amostra de lodo têxtil apresenta aumento no fluxo de calor até 1000 °C, enquanto que são observados eventos endotérmicos em 650 e 980 °C para a amostra de lodo de celulose e papel e em 600 e 800 °C para a amostra de lodo sanitário. Estes eventos também são visualizados para as amostras de lodo têxtil, porém, com menor intensidade.

Esses picos endotérmicos são provavelmente resultados da pirólise de materiais inorgânicos presentes na amostra. A partir destes eventos endotérmicos, verifica-se um aumento no fluxo de calor para um máximo em 1000 °C para a amostra de lodo sanitário, semelhante à amostra de lodo têxtil, e em 1100 °C para a amostra de lodo de celulose e papel numa intensidade menor, causada principalmente pelos eventos endotérmicos. A Figura 3 apresenta as curvas de ATG das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel sob atmosfera oxidante (combustão).

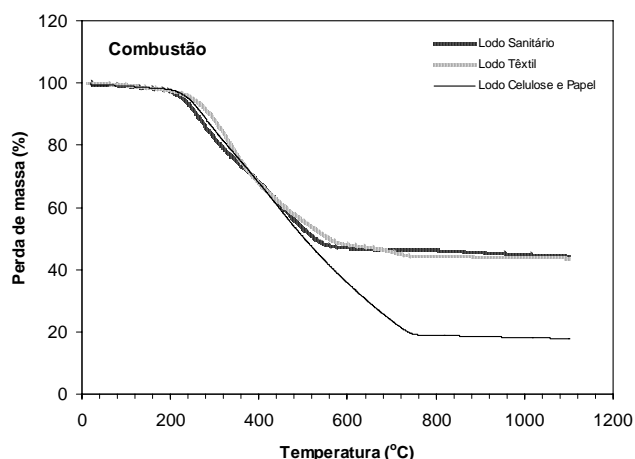


Figura 3. ATG das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel – combustão.

Para as condições de combustão, observa-se nas curvas de ATG (Figura 3), uma mesma tendência de decomposição térmica para as amostras de lodo sanitário e têxtil, com perdas de massa de aproximadamente 1,7 por cento até 160 °C, e máxima entre 170 e 580 °C de 50 a 53 por cento (em dois estágios). A amostra de lodo de indústria de celulose e papel apresenta perda de massa de aproximadamente 1,6 por cento até 160 °C, e uma perda máxima que inicia em 170 °C e se estende até 790 °C, de 80 por cento (em dois estágios), apresentando degradação mais lenta que as demais amostras de lodo analisadas.

A Figura 4 apresenta as curvas de ATD das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel sob atmosfera oxidante (combustão). Observa-se dos resultados, que as amostras de lodo de efluente sanitário e têxtil apresentam comportamento térmico frente à combustão semelhante na região de 160 a 600 °C, apresentando eventos exotérmicos (em dois estágios), assim como verificado nas curvas de ATG (Figura 3). A amostra de lodo de celulose e papel apresenta eventos exotérmicos em dois estágios na região de 160 a 790 °C.

Dos resultados apresentados pelas curvas de ATG e ATD para as três amostras de lodo, verifica-se um comportamento térmico bastante semelhante em condições de pirólise e combustão em vários dos estágios apresentados, que podem ser explicados segundo alguns autores (FONT *et al*, 2001; GÓMEZ-RICO *et al*, 2005; ZHU *et al*, 2007), como segue:

– até temperatura de 160 °C, ocorrem reações de desidratação;

– de 170 a 660 °C, ocorrem três estágios – o primeiro devido, principalmente, à decomposição de uma fração pequena da amostra, ou seja, de material biodegradável com cadeia molecular mais curta e compostos semivoláteis (entre 160 e 350 °C); o segundo devido à decomposição de uma fração maior intermediária, podendo ser referente a polímeros orgânicos presentes provenientes da estabilização (oxidação bioquímica) do lodo ou polímeros provenientes do lodo gerado no processo de tratamento (entre 350 e 450-500 °C); e o terceiro devido à decomposição de outra fração pequena, de material de difícil biodegradabilidade, como celulose ou similares (entre 500 e 660 °C). Cabe ressaltar que existe certa dificuldade em identificar exatamente onde os estágios iniciam e terminam, necessitando analisar o comportamento térmico por patamares menores dentro destes intervalos.

– acima de 660 °C ocorre, principalmente, a oxidação das cinzas e redução de materiais inorgânicos.

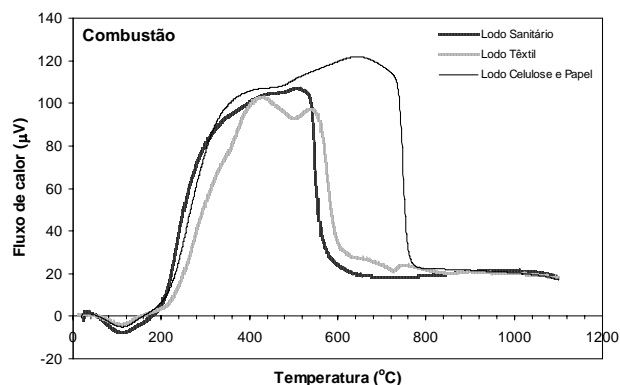


Figura 4. ATD das amostras de lodos sanitário, têxtil e celulose e papel – combustão.

Ainda, comparando-se os resultados apresentados pelas curvas de ATG (Figuras 1 e 3), observa-se um afastamento (decréscimo) entre as curvas de pirólise e combustão para temperaturas acima de 200°C, para todas as amostras. Segundo Gómez-Rico *et al* (2005), este comportamento pode ser explicado pelo fato do processo de combustão ser considerado como uma pirólise oxidativa, em que não existe elevada formação de cinza ou a cinza formada é oxidada simultaneamente à sua formação, resultando numa contribuição na liberação de energia. Isto ocorre principalmente em lodos provenientes de processos aeróbicos de estabilização, como os analisados neste trabalho. O decaimento entre as curvas é mais acentuado para a amostra de lodo de celulose e papel, provavelmente porque, neste caso, a oxidação ocorre numa taxa mais lenta que nas outras amostras, o que pode estar relacionado à maior porcentagem de carbono encontrado na análise elementar deste lodo, composto na sua maior parte por materiais fibrosos orgânicos.

Pelas análises de ATG observa-se também, que o lodo de efluente de celulose e papel apresenta menor porcentagem de resíduo ao final do ensaio em atmosfera oxidante (temperatura acima de 800 °C), em torno de 17 por cento, em relação à das amostras de lodo sanitário e têxtil, que foi de aproximadamente 44 por cento. No

ensaio sob atmosfera inerte (pirólise), as amostras apresentaram porcentagem de resíduo semelhante, em torno de 50 por cento.

4 – CONCLUSÕES

As amostras de lodo têxtil e sanitário apresentaram composição química e teores de sólidos bem próximos. O teor de carbono do lodo de celulose e papel foi quase o dobro dos encontrados para os lodos sanitário e têxtil, enquanto o teor de cinzas foi menor. As porcentagens de nitrogênio e enxofre foram relativamente baixas para todas as amostras, contribuindo para a redução de emissões gasosas poluentes durante um processo de combustão. Até aproximadamente 600 °C, o comportamento térmico foi bastante semelhante para todas as amostras frente a condições de combustão e pirólise. Nesta etapa, ocorreu a decomposição da maior fração de materiais orgânicos voláteis presentes nas amostras, ocasionando significativa liberação de energia. O lodo de celulose e papel foi mais estável termicamente que os demais lodos, com liberação de energia ainda acima de 600 °C. Todas as amostras tiveram menor porcentagem de resíduos ao final do processo de combustão do que em pirólise, com destaque para o lodo de celulose e papel. Mesmo com algumas características físicas e químicas diferenciadas, as três amostras de lodo apresentaram alto poder calorífico, em torno de 19 MJ/kg, demonstrando capacidade para liberação de energia muito próxima a de outras biomassas já empregadas como combustível na geração de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, I. A. **Demandas tecnológicas em meio ambiente e de empresas de saneamento**. Inovatec 2007, São Paulo, 2007.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 14 dez. 2006.
- ARAUTERM. **Tabelas Técnicas**. Disponível em: <http://www.arauterm.com.br/tabelas_combustiveis.html> Acesso em: 30 abr. 2008.
- BOROWSKI, H. C., SILVEIRA, J. L., EBINUMA, C. D., FERREIRA, E. D. **Análise de um modelo de co-geração a partir de resíduos sólidos urbanos**. Revista de Tecnologia, Fortaleza, v. 23, n. 1, p. 26-27, dez. 2002.
- BOTÃO, S. G., LACAVA, P. M. **Uso do bagaço da cana-de-açúcar para co-geração de energia elétrica no Estado de São Paulo e a comercialização do excedente da energia gerada**. Revista de Biociências, Taubaté, v. 9, p. 17-37, jul-set. 2003.
- BÜTTTELBRUN, V. **Avaliação do potencial de uso agrícola de lodo de esgoto na ETE – Rio Negrinho**. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2004.
- CAMPREGHER, N. **Estudo da viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. **Waste-to-energy plant for paper industry sludges disposal: technical-economic study**. Journal of Hazardous Materials, v. 81 p. 265–283, 2001.
- COSTA, V. R. **Plásticos a caminho da reciclagem**. Ciência Hoje. Rio de Janeiro, v. 18, n. 107, p. 8-15, mar. 1995.
- DE SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. Dissertação de Mestrado. EQA/UFSC, Florianópolis, fev. 2005.
- DE SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, I. C.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J. **Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study**. Resources Conservation and Recycling (2007), doi:10.1016/j.resconrec.2007.07.002.
- FONT, R.; FULLANA, A.; CONESA, J. A.; LLAVADOR, F. **Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG**. J. Anal. Appl. Pyrolysis, v. 58–59, p. 927–941, 2001.
- GÓMEZ-RICO, M. F.; FONT, R.; FULLANA A.; MARTÍN-GULLÓN, I. **Thermogravimetric study of different sewage sludges and their relationship with the nitrogen content**. J. Anal. Appl. Pyrolysis, v. 74, p. 421–428, 2005.
- GÖTTSCHEG L.; PAKARINEN H., *Recycled fiber and deinking*. Editora TAPPI, livro 7º., 2000.
- GREENBERG, A. E; EATON, A. D; CLESCERI, L. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20. Ed. Washington: American Public Health Assoc., 1998. 1 v.
- KNUTH, K. R. **Gestão Ambiental: Um estudo de caso para o setor têxtil – SC**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2001.
- MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de ETEs na agricultura: Estudo de caso Município de Rio das Ostras – RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2001.
- SÄNGER, M.; WERTHER, J.; OGADA, J. **NO_x and N₂O emission characteristics from fluidized bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge**. Fuel, v. 80, p. 167-177, 2001.
- YU, Y. H.; KIM S.D.; LEE J. M.; LEE K. H. **Kinetic studies of dehydration, pyrolysis and combustion of paper sludge**. Energy, v. 27, p. 457 – 469, 2002.
- ZHENG, G.; KOZIN'SKI, J.A. **Thermal events occurring during the combustion of biomass residue**. Fuel. v. 79, p. 181–192, 2000.
- ZHU, Y.; CHAI, X.; LI, H.; ZHAO, Y. **Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill**. Thermochimica Acta. doi:10.1016/j.tca.2007.07.003.