

## II-310 - DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ENERGIA TÉRMICA LIBERADA EM DIFERENTES MISTURAS DE LODO E ESCUMA DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E DE ÁGUA VISANDO OTIMIZAR O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO SECO

**Martina Carneiro<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil, Universidade Positivo.

**Letícia Gaziele Videira<sup>(2)</sup>**

Engenheira Civil, Universidade Positivo.

**Bettina Laporte Stephanes<sup>(3)</sup>**

Engenheira Civil, Universidade Positivo.

**Patricia Bilotta<sup>(4)</sup>**

Professor PhD do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, Universidade Positivo. Autor para contato.

**Gustavo Rafael Collere Possetti<sup>(5)</sup>**

Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e professor PhD do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE).

**Endereço<sup>(4)</sup>:** Programa de Mestrado e Doutorado em Gestão Ambiental, Universidade Positivo, Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5.300 – Campo Comprido, Curitiba, Paraná, CEP 81280-330. Brasil. E-mail: [pb.bilotta@gmail.com](mailto:pb.bilotta@gmail.com)

### RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar a quantidade de energia térmica liberada na combustão de diferentes misturas de lodo anaeróbio, espuma (material orgânico finamente em suspensão) e lodo aeróbio, provenientes do tratamento de esgoto sanitário e de lodo de estação de tratamento de água (ETA), com vistas a verificar se essas combinações elevam a quantidade de energia térmica útil para o aproveitamento energético desses subprodutos. Para isso, amostras de 500 g de lodo anaeróbio, espuma, lodo aeróbio e lodo de ETA foram coletadas em estações de tratamento localizadas no município de Curitiba/Paraná e submetidas a dois procedimentos: 1) análise térmica das amostras puras e das misturas de diferentes amostras com 50% em massa, que resultou em curvas de *Thermogravimetric Analysis* (TGA) e *Differential Thermal Analysis* (DTA), com a perda de massa das amostras em função do aumento da temperatura (25 até 600°C e taxa de aquecimento de 2,5°C/min); 2) determinação dos teores de sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV) das amostras puras pelo método 2540 G (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*). Os resultados obtidos mostraram que as quantidades de sólidos voláteis nas amostras puras foram: espuma (11,9%), lodo aeróbio (9,5%), lodo anaeróbio (11,2%) e lodo de ETA (5,8%). Já no analisador térmico, a mistura que liberou maior quantidade de energia foi a mistura de lodo aeróbio e espuma (7,0 kJ/g) e a menor quantidade na mistura de lodo de ETA e espuma (3,9 kJ/g) e o lodo de ETA produziu a menor liberação de energia durante a queima (1,6 kJ/g) devido à alta fração de sólidos inorgânicos. Concluiu-se que os lodos (anaeróbio e aeróbio) e a espuma estudados, quando combinados, potencializam a liberação de energia térmica na combustão controlada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo anaeróbio, lodo aeróbio, lodo de ETA, espuma, energia térmica.

### INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto sanitário (ETE) enfrentam dificuldades quanto à destinação de seus subprodutos (lodo e espuma) devido a fatores econômicos, técnicos e ambientais (PROSAB, 1999). Dessa forma, alternativas tecnológicas têm sido desenvolvidas para viabilizar o reaproveitamento desses subprodutos, transformando-os de resíduos em fontes de energia térmica ou elétrica (GROSS et al., 2008; ROSA et al., 2014; MULINARI, 2015).

O lodo proveniente do tratamento de esgoto doméstico é rico em matéria orgânica e nutrientes, no entanto contém microrganismos patogênicos que precisam ser eliminados ou reduzidos por meio de processos de higienização (POSSETTI et al., 2012). Por outro lado, o lodo gerado no tratamento de água é composto por sólidos inorgânicos, uma quantidade menor de sólidos orgânicos, que são arrastados durante a captação da água bruta, além compostos químicos diversos adicionais no processo de clarificação da água. A destinação do lodo de ETA e de ETE deve obedecer critérios ambientalmente aceitáveis e financeiramente viáveis. Dentre as alternativas disponíveis, destacam-se os processos térmicos, que propiciam a redução do volume do lodo, bem como a eliminação da biodegradabilidade e, conseqüentemente, de odores e da formação de chorume, e possibilitam o aproveitamento da energia térmica liberada na combustão do lodo seco (RULKENS, 2008; ROSA et al., 2014).

Tendo como base a problemática da gestão do lodo gerado em estações de tratamento de água e de esgoto sanitário e o potencial de aproveitamento energético desses subprodutos, este trabalho tem como objetivo determinar a quantidade de energia térmica liberada na combustão de diferentes misturas de lodo anaeróbio e escuma (material orgânico finamente em suspensão), assim como lodo aeróbio e lodo de ETA, com vistas a verificar se essas combinações elevam a quantidade de energia térmica útil para aproveitamento energético.

## PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para a realização desta pesquisa, amostras de lodo anaeróbio, lodo aeróbio, escuma e lodo de tratamento de água foram coletadas em estações de tratamento de esgoto e estação de tratamento de água situadas na região de Curitiba/Paraná. A Tabela 1 apresenta informações sobre as amostras coletadas.

**Tabela 1: Origem das amostras utilizadas no estudo.**

	SISTEMA DE TRATAMENTO	TIPO DE AMOSTRA	COLETA (*)
ETE 1	Gradeamento, caixa de areia, reatores anaeróbios (tipo UASB), lagoa de decantação, adensador e centrífuga	Lodo anaeróbio	Saída da centrífuga
		Escuma	Superfície do reator UASB
ETE 2	Gradeamento, caixa de areia, decantador primário, tanques de aeração, decantadores secundários e centrífuga	Lodo aeróbio	Saída da centrífuga
ETA	Sistema integrado com Calha Parshall, floculadores hidráulicos, decantadores de alta taxa, filtros rápidos, tanque de contato	Lodo	Saída da centrífuga

\* Quantidade de amostra coletada por ponto: 500 g.

Após a coleta, as amostras de lodo e escuma foram armazenadas em recipientes plásticos com tampas e etiquetadas com a identificação do local de coleta, data e tipo de lodo coletado, e, em seguida, foram armazenadas em geladeira, para manter suas propriedades físico-químicas. Posteriormente, retirou-se aproximadamente 300 g de cada tipo de amostra, denominadas de amostras matrizes, quantidades suficientes para a realização de todas as análises previstas na pesquisa. Para minimizar a influência da heterogeneidade das amostras de lodos e escuma (VIANA, 2013), realizou-se um processo de homogeneização de cada amostra matriz com o auxílio de um almofariz e mão-de-geral, bem como retirou-se os resíduos grosseiros visíveis com uma pinça, quando necessário. A Figura 2 ilustra as amostras matrizes de lodo e escuma após o processo de homogeneização.

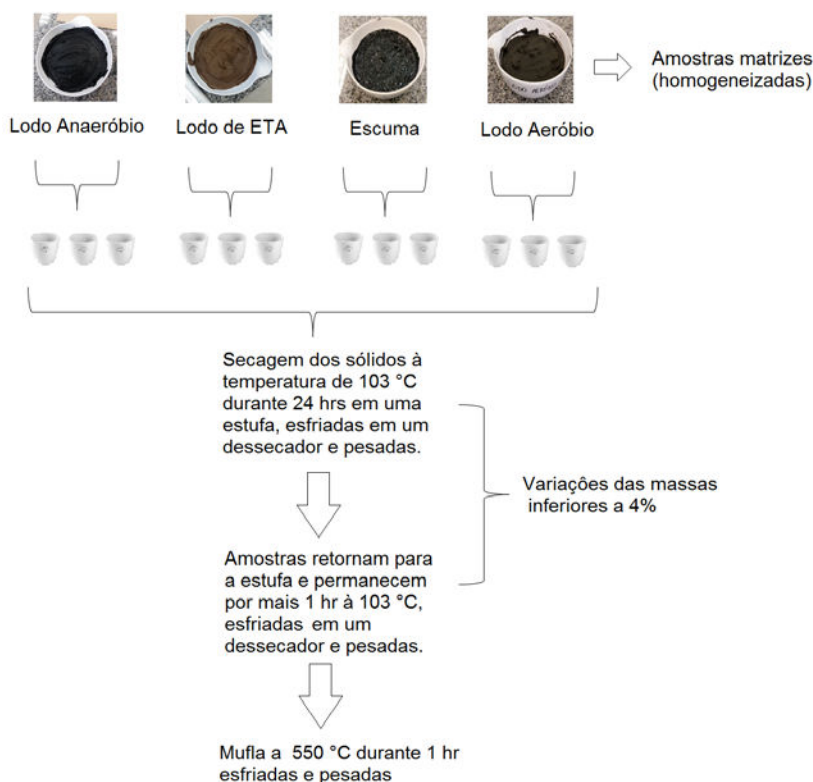


**Figura 1: Amostras matrizes de lodos e escuma homogeneizados.**

Concluída a preparação das amostras matrizes, realizou-se a determinação do teor de sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV) e a análise térmica das amostras puras e de combinações duas a duas (50%) de cada amostra, para se determinar a quantidade de energia térmica disponível. Os procedimentos utilizados são detalhados a seguir.

### Determinação do Teor Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

Para a determinação dos teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) das amostras matrizes, o procedimento utilizado foi o 2540 G descrito por APHA (1998). A Figura 2 apresenta um esquema do procedimento realizado em triplicatas de 25 g cada em cadinhos previamente calcinados a 550°C em uma mufla (marca Quimis modelo Q318M21).



**Figura 2: Representação esquemática do procedimento laboratorial para a determinação de sólidos totais, fixos e voláteis.**

Primeiramente cada triplicata das amostras puras foi submetida a aproximadamente 105°C por um tempo arbitrado de 24 horas em estufa (marca Quimis modelo Q314D121). Esse procedimento foi realizado para que a água presente nas amostras evaporasse e elevasse o teor de sólidos totais. Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa, esfriadas em um dessecador até temperatura ambiente e pesadas em uma balança analítica (marca Gehaka modelo BG 440), com precisão de 0,1 mg. Então, as amostras retornaram para a estufa por mais 1 hora a aproximadamente 105°C e foram novamente armazenadas em dessecador para serem esfriadas e pesadas. Esse procedimento foi repetido até que a diferença entre a massa das amostras não variasse mais que 4%, subtraída a massa do cadinho, obtendo-se ao final o teor de sólidos totais (ST) de cada triplicata das amostras puras.

Em seguida, as amostras secas foram colocadas em uma mufla por 1 hora a 550°C, depois foram levadas para um dessecador, para serem esfriadas, e, posteriormente, pesadas. Com os valores obtidos, descontou-se as massas dos cadinhos e obteve-se os teores de sólidos fixos (SF) das amostras puras.

A quantidade de sólidos voláteis (SV) em cada amostra analisada foi determinada utilizando-se a Equação 1.

$$SV = ST - SF$$

Equação (1)

### Determinação da Quantidade de Energia Térmica nas Amostras

A determinação da quantidade de energia térmica liberada na análise térmica subdividiu-se em duas etapas: a primeira em que se realizou um teste preliminar utilizando uma amostra de lodo anaeróbico para determinar o tempo de secagem necessário para a obtenção de um teor de sólidos totais de 80% - valor definido a partir do trabalho realizado por Mulinari (2015) com secadores térmicos. A segunda etapa utilizou-se as amostras matrizes puras e combinadas duas a duas (50% de cada amostra) para se obter a quantidade de energia térmica liberada na combustão controlada.

### Teste Preliminar

Com uma amostra de lodo anaeróbico previamente homogeneizada (teor de sólidos totais aproximado de 20%), retirou-se 4 exemplares de 20 g cada. As amostras foram secas por tempos arbitrados de 4 h, 8 h, 12 h e 24 h a 60°C, removendo-se apenas a água presente, e não os compostos orgânicos, obtendo-se no final da secagem diferentes teores de sólidos totais em função de tempos diferentes de secagem. O teor de sólidos totais das amostras foi determinado por meio de um analisador térmico, visto que o equipamento informa no início do processo de queima a quantidade de água em porcentagem, além da quantidade de energia liberada durante o processo de combustão.

### Análise Térmica das Amostras Puras e Combinadas

A partir das amostras puras, combinações duas a duas foram realizadas, onde cada amostra compunha 50% da mistura, obtendo-se no total 6 misturas e 4 amostras puras. As 10 amostras foram secas em estufa a 60°C durante 36 horas (condições estabelecidas com base nos resultados do teste preliminar). Após a secagem e esfriamento, aproximadamente 8 mg de amostra foram colocadas em uma cadinho de alfaalumina e transferidos para o analisador térmico (marca Shimadzu modelo DTG-60) para se obter as curvas TGA (*Termogravimetric Analysis*) e DTA (*Differential Thermal Analysis*), que representam, respectivamente, a variação da massa da amostra em função do tempo de secagem (ou temperatura) e a quantidade de energia térmica liberada/consumida durante o processo de combustão das amostras.

Alguns parâmetros foram aplicados à análise térmica, são eles: taxa de aquecimento de 2,5°C/min; temperatura inicial igual à temperatura ambiente e final de 600°C; atmosfera de ar sintético aplicada no interior do equipamento. Quando finalizado o processo de queima, aproximadamente 4 horas de duração, o equipamento foi desligado e encerrou-se o procedimento de queima. A Figura 3 apresenta o esquema do procedimento utilizado na análise térmica.

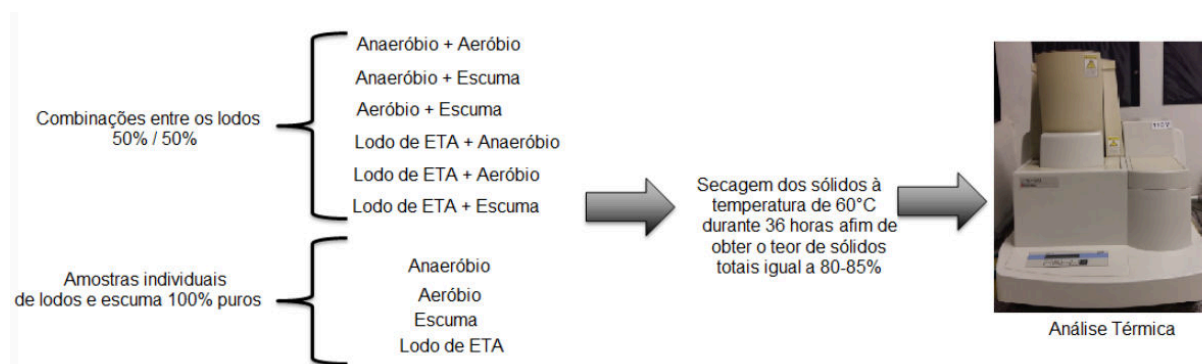


Figura 3: Esquema da análise térmica das amostras puras e combinadas.

Para a interpretação dos gráficos gerados pelo analisador térmico, estipulou-se o seguinte procedimento: a perda de água presente na amostra ocorreu até 105 C° (acima dessa temperatura há perda de materiais voláteis); com o auxílio de uma régua, traçou-se uma linha horizontal do início da curva endotérmica (fase com consumo de energia para remoção da água) até o início da curva exotérmica (fase com liberação de energia devido à combustão da amostra) para que a energia térmica consumida durante a secagem da água presente nas

amostras fosse obtida; traçou-se uma reta horizontal do ponto de início da curva exotérmica até o ponto em que a massa tornou-se constante (final da combustão). A Figura 4 mostra as etapas do procedimento adotado a partir de um exemplo de gráfico gerado pelo analisador térmico.

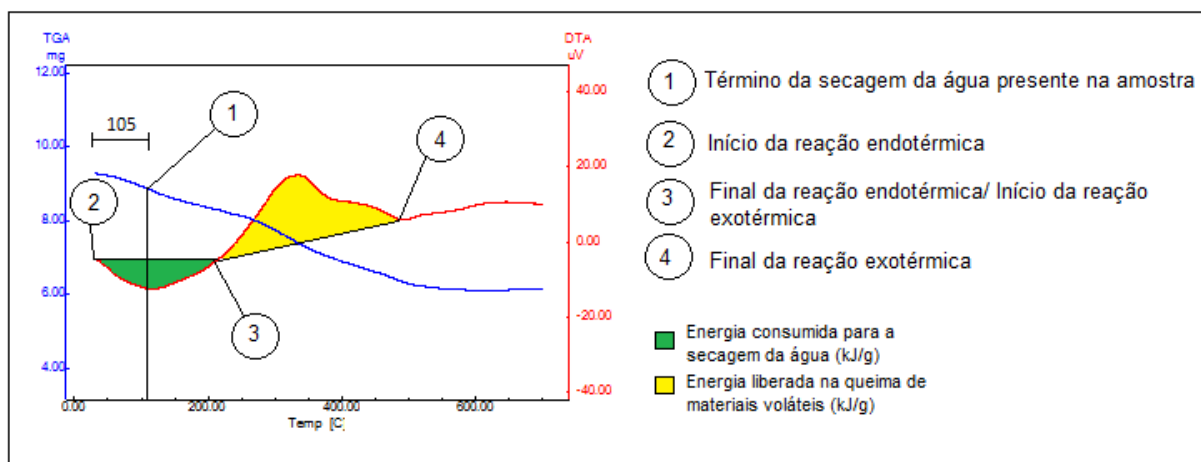


Figura 4: Procedimento utilizado na interpretação dos gráficos obtidos a partir do analisador térmico.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Análise dos Teores de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

O Gráfico 1 apresenta o resultado das análises de sólidos (totais, fixos e voláteis) realizadas nas amostras puras.

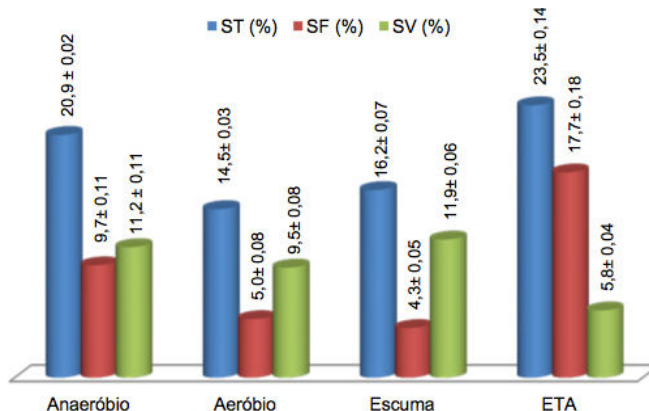


Gráfico 1: Teores de sólidos totais fixos e voláteis nas amostras puras.

Os sólidos voláteis presentes nas amostras representam uma estimativa da matéria orgânica, e os sólidos fixos (não voláteis) correspondem à matéria inorgânica ou mineral (VON SPERLING, 1996b). A escuma apresentou menor quantidade de sólidos inorgânicos se comparada ao lodo de ETA. Essa diferença pode ser explicada pela composição das amostras, pois, segundo Mello (2007), a escuma é geralmente composta por materiais orgânicos flutuantes, como graxas, óleos vegetais e minerais, gordura animal, sabões, entre outros. Já o lodo proveniente de ETA, é composto por partículas de solo, areia, minerais e produtos químicos empregados durante o tratamento da água (MACEDO, 2000).

No início dos procedimentos laboratoriais as amostras puras (não combinadas) apresentavam cerca de 80% de água e 20% de sólidos totais em 25 g de amostra úmida. A escuma apresentou menor quantidade de sólidos inorgânicos (4,3%) e o lodo de ETA a maior parcela, com aproximadamente 17,7% de sólidos inorgânicos. Os maiores resultados de sólidos voláteis foram do lodo anaeróbio (11,2%) e escuma (11,9%). Todas as amostras apresentaram valores entre 9 e 12% de sólidos voláteis, exceto o lodo de ETA com 5,8%.

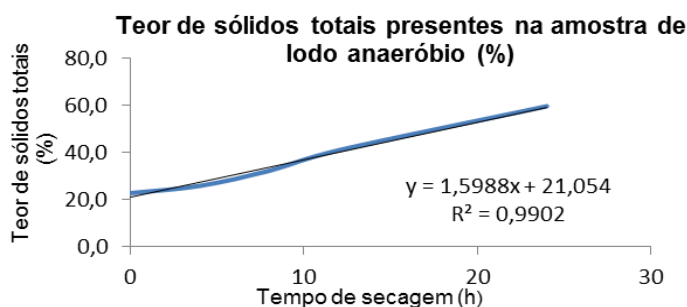
### Análise dos Resultados do Teste Preliminar

A Tabela 1 apresenta os resultados do teste preliminar realizado para se obter a curva de secagem do lodo em relação ao teor de sólidos totais.

**Tabela 1: Teor de sólidos totais da amostra de lodo anaeróbio em diferentes tempos de secagem.**

TEMPO DE SECAGEM (h)	TEMPERATURA (°C)	SÓLIDOS TOTAIS (%)
0	Ambiente	22,88
4	60	25,96
8	60	32,35
12	60	41,06
24	60	59,76

Com os dados dos tempos de secagem do lodo e dos teores de sólidos totais foi possível construir o Gráfico 2 e determinar a equação da reta (Equação 2) que melhor representa a distribuição dos pontos. Substituindo-se  $y=80\%$  (teor de sólidos totais) na equação 2, obteve-se o tempo de secagem de aproximadamente 36 horas, tempo esse utilizado na secagem de todas as amostras (puras e combinadas).



**Gráfico 2: Tempo de secagem em relação ao teor de sólidos totais.**

$$Y = 1,5988 X + 21,054$$

Equação (2)

### Análise dos Resultados do Analisador Térmico

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise térmica para determinação da quantidade de energia liberada e consumida durante a combustão das amostras puras e das amostras combinadas.

**Tabela 2: Quantidade de energia envolvida na combustão das amostras puras e combinadas.**

AMOSTRAS (puras e combinadas)	ENERGIA CONSUMIDA NA SECAGEM DO LODO (kJ/g)	ENERGIA ÚTIL LIBERADA (kJ/g)
Escuma	0,04	9,3
Escuma + Lodo Aeróbio	0,6	7,0
Lodo Anaeróbio	0,4	6,3
Lodo Aeróbio + Lodo Anaeróbio	0,3	6,0
Escuma + Lodo Anaeróbio	0,4	5,7
Lodo de ETA + Lodo Anaeróbio	0,2	4,9
Lodo Aeróbio	0,4	4,5
Lodo de ETA + Lodo Aeróbio	0,5	3,9
Lodo de ETA + Escuma	0,1	3,9
Lodo de ETA	0,6	1,6

De acordo com os resultados da análise térmica, todas as amostras combinadas continham aproximadamente 96% ( $\pm 0,9$ ) de sólidos totais (ST), apresentando, portanto, valores diferentes do que foi previsto no teste preliminar (80-85%). Essa diferença pode ser explicada pela permanência das amostras secas por alguns dias em dessecador até a realização da análise térmica. Porém, a redução da umidade não interferiu na quantificação da energia consumida e liberada na combustão das amostras, pois todas as amostras foram armazenadas sob as mesmas condições e apresentaram teores de ST semelhantes.

O lodo de ETA apresentou a maior quantidade de energia consumida e a menor liberada entre todas as amostras puras, caracterizando-se como um combustível de pouco interesse. Por outro lado, a amostra pura de escuma consumiu 0,04 kJ/g e liberou 9,3 kJ/g de energia, caracterizando-se como a amostra pura com o maior valor de energia liberada e a menor quantidade de energia consumida entre todas as amostras.

As misturas compostas por lodo de ETA apresentaram os menores valores (3,9 a 4,9 kJ/g) em liberação de energia. Na combinação do lodo de ETA com o lodo anaeróbio, pode-se observar que as energias liberadas pelas amostras puras de lodo de ETA e anaeróbio foram, respectivamente, 1,6 e 6,3 kJ/g, e dos lodos combinados foi de 4,9 kJ/g, ou seja, a realização da mistura de lodo de ETA com o lodo anaeróbio aumentou a liberação de energia.

Todas as amostras puras e combinadas apresentaram quantidade de energia liberada (1,6 a 9,3 kJ/g) superior à quantidade energia consumida (0,04 a 0,6 kJ/g). O lodo aeróbio com a escuma apresentou a maior energia liberada (7,0 kJ/g) dentre todas as combinações. As amostras individuais de lodo aeróbio e anaeróbio apresentaram, respectivamente, 4,5 kJ/g e 6,3 kJ/g de liberação de energia e quando combinadas tiveram a segunda maior quantidade de energia liberada dentre as combinações realizadas (6,0 kJ/g).

## **CONCLUSÃO**

A análise do teor de sólidos das amostras puras, pelo método de secagem e calcinação, revelou que o lodo de ETA obteve o maior teor de sólidos fixos ( $17,7 \pm 0,18\%$ ) e o menor valor de sólidos voláteis ( $5,8 \pm 0,04\%$ ), enquanto que a escuma apresentou o maior teor de sólidos voláteis ( $11,9 \pm 0,06\%$ ) e o menor valor de sólidos fixos ( $4,3 \pm 0,05\%$ ).

O lodo aeróbio com a escuma apresentou a maior energia liberada (7,0 kJ/g) dentre todas as combinações e a escuma se destacou pela quantidade de energia liberada (9,3 kJ/g) como amostra pura, enquanto o lodo de ETA produziu a menor energia (1,6 kJ/g) durante a queima, devido à elevada quantidade de sólidos inorgânicos na amostra de lodo de ETA (30,2%). Também observou-se que as amostras combinadas tiveram um aumento no desempenho energético, uma vez que quando analisadas individualmente, apresentaram valores de energia inferiores, como por exemplo, a combinação de lodo de ETA com o lodo anaeróbio, os quais geraram 4,9 kJ/g, enquanto que a amostra pura de lodo de ETA liberou apenas 1,6 kJ/g de energia.

Com exceção do lodo puro proveniente do tratamento de água, os resultados apresentados neste trabalho comprovaram a capacidade energética dos resíduos produzidos nas estações de tratamento, com destaque as amostras de escuma e a mistura de lodo aeróbio com a escuma, que apresentaram os maiores valores de energia liberada.

Os resultados obtidos mostram que a combinação entre lodo de ETE, escuma e lodo de ETA pode ser uma alternativa interessante para otimizar o aproveitamento energético desses subprodutos do tratamento de esgoto e de água.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. APHA, American Public Health Organization. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20ª edição. 1998.
2. GROSS, B.; EDERA, C.; GRZIWAC, P.; HORSTB, J.; KIMMERLEB, K. Energy recovery from sewage sludge by means of fluidized bed gasification. Waste Management, v. 28 (10), p. 1819-1826, 2008.
3. MACEDO, Jorge Antônio Barros de. Aguas & Aguas. Juiz de Fora: Ortofarma, 2000.

4. MELLO, Edson José Rezende de. Tratamento de esgoto sanitário: Avaliação da estação de tratamento de esgoto do Bairro Novo Horizonte na cidade de Araguari – MG. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Sanitária). Uniminas, Uberlândia, 2007.
5. MULINARI, Renata. Estudo de viabilidade econômica e financeira para a substituição de um sistema de estabilização alcalina prolongada de lodo de estação de tratamento de esgoto por um sistema térmico com o aproveitamento de energia do biogás e do lodo seco. 96f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Positivo, Curitiba, 2015.
6. POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., ANDREOLI, C. V., BITTENCOURT, S., CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2012.
7. PROSAB. Programa de pesquisa em saneamento básico. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. 1ed. Rio de Janeiro: Sanepar, 1999.
8. ROSA, André Pereira, CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos, MELO, Gilberto Caldeira Bandeira. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. Viçosa-MG, 2014.
9. RULKENS, W. Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options, *Energy Fuels*, v. 22 (1), p. 9–15, 2008.
10. VIANA, Marcelo Mendes. Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.