

### III-254 - DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR, PODER CALORIFICO E O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE AMOSTRAS DA FRAÇÃO BIODEGRADÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES

#### **Adriana Garcia<sup>(1)</sup>**

Doutorando em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas, São Paulo; mestre em Engenharia Química pela Escola de Engenharia Química de Lorena - USP (2005); graduação em Engenharia Química pela Escola de Engenharia Química de Lorena - USP (2003). Iniciou suas atividades profissionais no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (2007) no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (LCL) com experiência em combustíveis sólidos e líquidos.

#### **Marcelo Aparecido Mendonça<sup>(1)</sup>**

Doutorando em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas, São Paulo; mestre em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (2005); graduação em Engenharia Química pelas Faculdades Oswaldo Cruz (2000), São Paulo. Atualmente é pesquisador e chefe do Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), com experiência em combustíveis sólidos e líquidos, óleos lubrificantes e resíduos sólidos.

#### **Jorge Luis Dias dos Santos<sup>(1)</sup>**

Mestre em Processos Industriais pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2014); graduação em Química Industrial pela Faculdades Oswaldo Cruz (2008). Atualmente trabalha no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Experiência de 18 anos na área petroquímica em ensaios químicos e físico-químicos em combustíveis, biocombustíveis líquidos e sólidos, além de óleo lubrificante e óleo combustível.

#### **Claudia Echevengua Teixeira<sup>(1)</sup>**

Doutora em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Sherbooke (2001), Canada. Mestre em Engenharia Civil, pela Universidade Estadual de Campinas (1993). Bióloga pela Universidade de Caxias do Sul (1989). Pós-doutorado pela Universidade do Estado do Arizona (2008). É pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas, atuando em gestão de resíduos sólidos e processos biológicos, avaliação ambiental de processos e produtos.

#### **Fernanda Peixoto Manéo<sup>(1)</sup>**

Mestre em Gestão Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (2013); pós-graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial (2012); graduação em Engenharia Agrônômica pela Faculdade Integral Cantareira (2003). É pesquisadora assistente do Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do IPT. Experiência em planos de gestão de resíduos conforme a PNRS (Lei nº 12.305/10) e classificação de resíduos.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Professor Almeida Prado, 532- Butantã – São Paulo – SP CEP: 055020 – 901 – Brasil - Tel: +55 (11) 3767-4572 - Fax: +55 (11) 3767-4552 - e-mail: [adrianag@ipt.br](mailto:adrianag@ipt.br)

#### **RESUMO**

O conhecimento da composição dos resíduos e de suas propriedades físico-químicas e térmicas é fundamental para a definição de sistemas de tratamento, constituindo uma etapa do planejamento necessária quando se pensa em soluções para resíduos sólidos. No caso de resíduos sólidos domiciliares, considerando sua heterogeneidade e a diversidade de materiais que o constitui, a obtenção de dados representativos e a aplicação de métodos analíticos para a determinação de alguns parâmetros podem ser críticos. Segundo dados da ABRELPE (2014), a geração total de RSU no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, índice superior à taxa de crescimento populacional no período, que foi de 0,9 %. Esse trabalho está sendo desenvolvido em parceria com a comunidade do município de Bertoga, na baixada santista. As amostras de resíduos foram coletadas no verão de 2016 e caracterizadas quanto a composição imediata e elementar. Após a caracterização foi estimada a fórmula empírica do composto orgânico e por meio do balanço de massa determinou a composição dos gases.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo sólido, biodegradação, biogás, tratamento de resíduo, produção de energia.

## **INTRODUÇÃO**

O Brasil ainda é muito incipiente no aproveitamento de Resíduo Sólido Urbano (RSU) para geração de combustíveis e energia elétrica, embora tenha tradição em processos de carbonização para produção de sólidos (carvão vegetal). Os aterros motivaram durante anos a criação de processos alternativos de captação e combustão de metano, para os quais foram dados incentivos econômicos; porém, mesmo atrelados a sistemas de geração de energia, não apresenta uma solução ao passivo do lixo urbano, de forma que esta alternativa tem sido abandonada na Europa.

Quanto ao tipo de destinação, em 2014 foi registrado o índice de 58,4 % de destinação final adequada, o que significa que o restante foi dispensado em lixões ou aterros controlados, sendo que estes últimos pouco se diferenciam dos lixões (ABRELPE, 2014). No que se refere à coleta seletiva, em 2014 cerca de 65 % dos municípios brasileiros registraram alguma iniciativa nesse sentido. Porém, muitas destas atividades resumem-se à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, que não abrange todo o potencial de recuperação dos resíduos recicláveis (ABRELPE, 2014).

De fato, além de lixões e aterros, no Brasil poucas das tecnologias disponíveis para disposição/tratamento de RSU são exploradas de forma significativa. Quanto à digestão anaeróbia, até o momento não foram encontrados registros de plantas em operação no Brasil para tratamento de RSU (FADE / UFPE, 2014), embora a iniciativa esteja sendo discutida para municípios como Piracicaba, Embu, e Jundiá.

Por outro lado, a tecnologia de digestão anaeróbia já está desenvolvida no país para o tratamento biológico de efluentes, de dejetos de animais em fazendas (Bain & Company, 2012) e de resíduos industriais específicos. O grau de complexidade das plantas para esta finalidade varia, desde lagoas anaeróbias e reatores caseiros até reatores de escala municipal.

Mudanças significativas em relação ao tratamento e disposição de RSU no país são esperadas para os próximos anos, impulsionadas pela promulgação de marcos legais importantes do setor de resíduos, como a Política Nacional de Saneamento Básico – instituída na Lei nº 11.445, de 2007 – e, principalmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – formalizada na Lei nº 12.305, de 2010, e posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 2010.

Embora as mudanças previstas demorem a acontecer, as atuais iniciativas no setor de resíduos sólidos brasileiro passaram a se concentrar em técnicas de tratamento e de valorização de resíduos com aproveitamento energético (Fricke et al., 2015).

O presente trabalho apresenta os estudos realizados para a determinação da composição química, poder calorífico e o potencial de produção de biogás de amostras da fração biodegradável de resíduos sólidos domiciliares do município de Bertiooga.

## **METODOLOGIA UTILIZADA**

Os estudos foram conduzidos no Município de Bertiooga, situado na região da Baixada Santista do Estado de São Paulo. As amostras para o estudo da composição elementar, poder calorífico e potencial de biodegradação foram obtidas a partir de uma campanha de caracterização física e gravimétrica dos resíduos sólidos da coleta regular do município, realizada no verão de 2016.

O procedimento de amostragem foi realizado pelo método de quartejamento (Figura 1), perfazendo em média 43 toneladas. Após a homogeneização, as amostras foram coletadas e depositadas em um recipiente de 200 litros, previamente pesado. Esse procedimento foi realizado em duplicata.

Após a coleta dos recipientes, os 400 litros de resíduos foram despejados, as embalagens foram rompidas e os resíduos foram segregados da seguinte forma: orgânicos (restos de alimentos, vegetação); poliestireno (PS) (isopor); polipropileno (PP); PET (polietileno) colorido; PET (polietileno) incolor; polietileno de alta densidade (PEAD); polietileno de baixa densidade (PEBD); PVC; plástico filme; metais não ferrosos (alumínio); aerossóis; latas de alumínio; lata de folha de flandres; metais ferrosos (ferro); papelão; papel

colorido; papel branco; têxteis em geral; couro; borracha; madeira; rejeito; vidro colorido; vidro incolor; logística reversa (pilha, bateria, eletroeletrônicos, pneus, lâmpadas fluorescentes, óleos lubrificantes e embalagens agroquímicas); e, por último, embalagens longa vida.



**Figura 1: Caracterização física e gravimétrica dos resíduos de Bertiooga.**

Após a segregação e pesagem dos resíduos, estes foram novamente misturados e então foi feito o quarteamento, conforme a NBR 10.007 (ABNT, 2004), para a obtenção de amostras de restos de alimentos (resíduos orgânicos). A amostra da fração orgânica foi colocada em estufa a 50°C durante 07 dias (168 horas) para secagem.

A amostra foi dividida em duas porções para posterior comparação de resultados. Após a secagem, as amostras foram armazenadas a temperatura de 10°C e posteriormente foram esterilizadas em autoclave sob a temperatura de 121 °C durante 20 minutos, para garantir a segurança dos técnicos durante o manuseio das amostras.

Durante o processo de esterilização em autoclave ocorre o ganho de umidade pela amostra e, como os ensaios de caracterização são realizados em base seca, as amostras foram novamente submetidas ao processo de secagem, em estufa a 105 °C durante 12 horas.

Após a etapa de secagem, as amostras foram trituradas usando o moinho de facas tipo, modelo TE-680, marca Tecnal. Por se tratar de uma amostra heterogênea contendo diferentes materiais, tais como têxtil, espumas, plásticos e outros de pequenas dimensões que não foram separados na caracterização física, a amostra apresentou aglomerados conforme Figura 2.



**Figura 2: Amostra aglomerada no moinho.**

Buscando diminuir a quantidade de aglomerados, visto que os métodos para a caracterização físico-química exigem granulometria de 60 mesh, o material foi moído usando uma peneira de malha mais fina (Figura 3).



**Figura 3: Amostras com granulometria de 60 mesh.**

As amostras foram caracterizadas conforme metodologias citadas abaixo:

- **Determinação da Umidade Total (U) e Residual (u)**

Para as amostras de restos de alimentos, foram realizados ensaios de teor de umidade, matéria orgânica e de voláteis. O ensaio de teor de umidade foi por meio da secagem das amostras em estufa, a 105 °C. Em seguida, as amostras foram trituradas, homogeneizadas e peneiradas em malha de 9,5 mm, para a realização do ensaio de teor de matéria orgânica, pelo método da queima em mufla a 440 °C. Após o ensaio de teor de matéria orgânica, a amostra foi novamente colocada na mufla, a 550 °C, para a realização do ensaio de teores de voláteis.

- **Determinação de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio**

A combinação da elevada temperatura do forno (900 a 1050°C) com a vazão do oxigênio puro, resultam na combustão de uma amostra de massa conhecida. Todo o material contido na amostra passa por um processo de oxi-redução e o carbono, hidrogênio e nitrogênio contidos são liberados na forma de CO<sub>2</sub>, vapor de água e N<sub>2</sub>, respectivamente. O equipamento utilizado foi o analisador de C, H, N modelo Vario EL Cube.

- **Determinação do Teor de cinzas**

O teor de cinzas é o teor aproximado da quantidade dos minerais e materiais inorgânicos em uma amostra. É normalmente considerado como impureza ou contaminante. A amostra é inflamada até sobrar apenas cinzas e carbono. O resíduo carbonáceo é reduzido a cinzas por aquecimento em mufla com circulação de ar com capacidade para atingir 950°C, marca MH Fornos e estufa com capacidade para atingir 105°C.

- **Determinação de Matérias Voláteis**

Matérias voláteis são determinadas pelo aquecimento do material seco, em cadinho tampado para que a amostra não seja oxidada em contato com o ar e não ocorra a volatilização do carbono como CO<sub>2</sub>, perdendo assim parte (ou todo) carbono fixo, que é uma medida indireta que utiliza as determinações de teor de cinzas e teor de materiais voláteis.

- **Determinação do Teor de Enxofre**

O teor de enxofre presente em uma amostra é um parâmetro importante tanto para quantificação quanto para questões ambientais. O equipamento utilizado foi o analisador de enxofre por Infravermelho LECO S-144DR. Todo o material contido na amostra passa por um processo de oxi-redução e o enxofre contido é liberado na forma de SO<sub>2</sub>. A célula de infravermelho mede o SO<sub>2</sub> e o converte em % enxofre, utilizando a curva analítica e a massa da amostra.

- **Determinação do Teor de oxigênio**

O cálculo do teor de oxigênio é obtido por meio dos teores de: cinzas, enxofre, carbono, hidrogênio e nitrogênio. Este método se aplica para carvão, biomassa, madeira e óleo combustível.

- **Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)**

O PCS é a quantidade de energia liberada quando uma unidade de massa de um combustível é queimado na bomba calorimétrica a pressão constante e sob condições específicas com toda a água formada condensada no

estado líquido. Para o PCI, é necessário que todos os produtos gerados, incluindo a água, estejam no estado gasoso. As amostras foram analisadas em um calorímetro automático Parr modelo 5400 de sistema isoperibol utilizando bombas de oxigênio com temperatura controlada por um sistema de circulação interna e um aquecedor elétrico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição elementar das amostras é apresentada na Tabela 1. É possível verificar a heterogeneidade das amostras principalmente para o elemento nitrogênio e para o teor de cinzas, conseqüentemente, para o oxigênio que é calculado por meio desses elementos. O teor de nitrogênio alto se deve pela quantidade de resíduos alimentares e sobras vegetais presentes na amostra, já o alto teor de cinzas pode ser explicado pela presença de materiais inorgânicos, tais como metais e silicatos (terra e pedras).

**Tabela 1: Composição elementar da fração orgânica.**

Amostras	C (% massa)	H (% massa)	N (% massa)	S (% massa)	O (% massa)	Cinzas (% massa)
<b>Amostra 1</b>	46,0	6,70	1,8	0,12	27,78	17,6
<b>Amostra 2</b>	47,3	6,76	3,0	0,16	31,58	11,2

Conforme descrito por Tchobanoglous (1993) a fórmula química pode ser estimada pelos resultados da análise elementar (Tabela 2).

**Tabela 2: Estimativa da fórmula química da fração orgânica.**

Amostras	Decomposição anaeróbica	Fórmula Química
<b>Amostra 1</b>	lenta	$C_{20}H_{52}O_{14}N$
<b>Amostra 2</b>	lenta	$C_{18}H_{31}O_9N$

Após a estimativa da fórmula química do resíduo, foi realizado o balanceamento das equações químicas para verificar o uso do resíduo na produção de gases a partir da reação de decomposição anaeróbica da amostra. Para efeito de simplificação os índices dos elementos foram arredondados, desta forma em alguns casos ocorrerá diferenças de até 2 unidades no fechamento do balanceamento.



Os resultados de umidade contida nas amostras podem ser analisados na Tabela 3, assim como a determinação do poder calorífico das amostras coletadas no município piloto. Conforme os dados apresentados o teor de umidade é próximo ao encontrado nos resíduos sólidos brasileiros e os valores de PCS indicam que o material orgânico coletado pode ser usado em produção de energia, similar a biomassa em base seca.

**Tabela 3: Análise imediata e poder calorífico.**

Amostras	U (% massa)	Matérias voláteis (% massa)	PCS (MJ/kg)
<b>Amostra 1</b>	61,5	71,2	18,81
<b>Amostra 2</b>	70,6	74,1	20,51



Para estimar a quantidade de gás gerado pela decomposição anaeróbica do resíduo foi adotada a base de cálculo apresentada na Tabela 4 e a estimativa do resíduo orgânico decomposto.

**Tabela 4: Base de cálculo e estimativa do resíduo orgânico decomposto.**

Descrição	Amostra 1	Amostra 2
Base de cálculo (100 kg de RSU)	100	100
Massa total de material orgânico em 100 kg de RSU incluindo umidade (kg)	80	80
Umidade (kg)	40	40
Matéria orgânica seca (kg)	40	40
Estimativa da quantidade de material decomposto permanece como cinza (%)	17,6	11,2
Resíduo orgânico decomposto (base seca) - kg	33,0	35,5

Utilizando a composição molar dos elementos e fórmula química estimada para de cada amostra foi realizado o balanço de massas para a estimativa da composição dos gases, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5: Estimativa da quantidade de gases formados na decomposição anaeróbica das amostras**

Descrição	Massa (kg)		Volume (m <sup>3</sup> )		Composição gases (%)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
Metano	14,33	14,41	19,96	20,08	58,88	57,07
Dióxido de Carbono	27,58	29,88	13,94	15,10	41,12	42,93
NH <sub>3</sub> residual	0,86	1,41	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O consumida	9,81	10,26	-	-	-	-

Também foi possível estimar a quantidade de gás gerado por unidade de massa de resíduo, conforme apresentado na Tabela 6. Apesar da heterogeneidade das amostras, os valores da quantidade de gases gerados ficaram próximos.

**Tabela 6: Base de cálculo e estimativa do resíduo orgânico decomposto.**

Descrição	Amostra 1 (m <sup>3</sup> /kg)	Amostra 2 (m <sup>3</sup> /kg)
Material Orgânico (base seca)	1,03	0,99
Resíduo sólido (base 100 kg)	0,34	0,35

## CONCLUSÕES

O resíduo sólido brasileiro é constituído por uma fração de material orgânico (cerca de 50 %), o que tornaria o processo potencialmente mais produtivo por massa de resíduo total. Considerando o potencial de geração de energia proveniente do biogás e a conservação de energia por meio da reciclagem de materiais da fração não orgânica, é possível tornar os resíduos sólidos domiciliares um material atrativo e viável para o país.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se verificar que os resíduos domiciliares podem ser utilizados na produção de energia, visto que o valor de poder calorífico é similar ao valor de bagaço de cana-de-açúcar, muito utilizada como combustível sólido.

Durante a etapa de preparação da amostra de resíduo, foi observado que a heterogeneidade da amostra exige estudos mais detalhados nos processos de separação e segregação da fração orgânica, retirando materiais inorgânicos que venham contaminar diminuindo o potencial energético do resíduo orgânico.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. 2014. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014. Disponível em: <[www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf](http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf)>. Acesso em: nov./2015.
2. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 10.007 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 25p.
3. BAIN & COMPANY. Estudo Econômico-Financeiro para destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), 2012. Disponível em: <[http://www.ppp.mg.gov.br/images/documentos/Projetos/em\\_elaboracao/Residuos\\_Solidos/Estudo%20Bain%20-%20Company.pdf](http://www.ppp.mg.gov.br/images/documentos/Projetos/em_elaboracao/Residuos_Solidos/Estudo%20Bain%20-%20Company.pdf)>. Acesso: em 11/15.
4. BRASIL. Lei no 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 ago. 2010.
5. FADE/UFPE - Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. 2014.
6. FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M (Coords) (2015). Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.
7. UNEP & ISWA (2015). Global Waste Management Outlook. United Nations Environment Programme (UNEP) & International Solid Waste Association (ISWA), 2015.
8. U.S. Department of Defense. Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. April, 2011.
9. IPT, Relatório técnico 146017-205, São Paulo, São Paulo, 2016.
10. TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. Boston: McGraw-Hill, 1993, 978 p.